

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Autor: Pablo Rodríguez de la Cruz
Tutor: M^a Gloria del Río Cidoncha

Dpto. Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Departamento de
Ingeniería Gráfica ETSI / ETSIA / ETSIE /

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales (GITI)

Medición y modelado 3D de piano Kawai K-25EA en CATIA V5

Autor:
Pablo Rodríguez de la Cruz

Tutor:
M^a Gloria del Río Cidoncha
Profesor titular

Dpto. de Ingeniería gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Grado: Medición y modelado 3D de piano Kawai K-25EA en CATIA V5

Autor: Pablo Rodríguez de la Cruz
Tutor: M^a Gloria del Río Cidoncha

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia
A mis maestros

«Siempre intento hacer lo que no sé hacer, para poder aprender a hacerlo»
Pablo Picasso

Agradecimientos

A mi familia que me ha apoyado incondicionalmente

A mis amigos, por estar siempre ahí

A mis profesores, por haberme enseñado...

Resumen

El presente Trabajo Fin de Grado pretende abordar la mecánica de un piano vertical Marca KAWAI mod. K-25 modelando cada una de sus piezas en 3D y posteriormente ensamblándolas para conseguir el producto final.

La elección del conjunto mecánico a modelar viene motivada por ser el piano un ejemplo muy representativo de un instrumento musical de mecánica compleja, cuyas características apenas han sufrido variación desde el siglo pasado y cuya modelación en 3D supone un reto para el autor del trabajo.

El trabajo consta de 3 fases: medición, modelado y ensamblaje. Al no contar con planimetría de referencia, se ha llevado a cabo la medición de las distintas piezas que lo componen, y posteriormente, a través del soporte informático que supone el programa CATIA V5 se ha procedido a su modelación. Al mismo tiempo que se han ido modelando las piezas se han ido ensamblando para verificar su correcta distribución en el conjunto y su aplicabilidad.

El resultado es un diseño en 3D de este modelo de piano vertical, despiezable y dinámico, que sirve como ejemplo a nivel general de la utilidad y alcance el programa CATIA V5 en el estudio y representación gráfica de modelos mecánicos. Al mismo tiempo, se analiza la proyección que puede tener este trabajo para futuras aplicaciones, tanto desde el punto de vista ingenieril como desde el punto de vista didáctico y su aplicación a la docencia, tanto en las escuelas de mecánica como en los conservatorios de música.

Abstract

This project aims to address the mechanics of an upright piano KAWAI model K-25 by 3D modelling its pieces one by one. Afterwards, they will be put together for the final model.

Three aspects were key in choosing the upright piano for this project, pianos are a very distinctive example of musical instruments with complex mechanics, whose features have hardly changed since the last century. Secondly, the challenge that relates to 3D modelling these mechanisms.

The project is set in three stages as well: measuring, modelling and montage. In the first stage the different pieces of the piano were measured, since reference planimetry was not available. Afterwards, modelling was developed using CATIA V5, a computer support program. Simultaneously, the pieces were put together to confirm it was the right distribution in the model and its usefulness.

This results in a 3D design of a particular upright piano it is separable and dynamic, and it is an indication in the usefulness and range of the program CATIA V5 in the study and graphic representation of mechanical models. Likewise, we analyse the potential applications of this project in both the engineering and the teaching field in mechanic schools and music conservatories.

Índice

Agradecimientos	vii
Resumen	viii
Abstract	ix
Índice	x
Índice de Figuras	xii
Índice de Tablas	xv
1 Introducción. Objetivo y justificación	1
2 Estructura del Trabajo	3
2.1. Resumen	3
2.2. Introducción	3
2.3. El piano como instrumento musical	3
2.4. Materiales y métodos	3
2.5. Desarrollo del trabajo	3
2.6. Resultados	4
2.7. Conclusiones. Proyección del trabajo	4
3 El piano como instrumento musical	5
3.1. Breve historia y evolución. Tipos de piano. Piano vertical	5
3.2. El piano en la actualidad	8
3.2.1. Piano de Cola	9
3.2.2. Piano vertical o de pared	9
3.2.3. Piano electrónico	9
3.3. Partes del piano	10
3.3.1. Tabla armónica	10
3.3.2. Puente	10
3.3.3. Cuerdas	11
3.3.4. Bastidor	11
3.3.5. Clavijero	12
3.3.6. Teclado	12
3.3.7. Tapa	13
3.3.8. Caja	14
3.3.9. Pedales	14
3.4. Piano Kawai K-25	15
3.4.1. Modelos verticales. Serie K	15
3.4.2. Tabla armónica	15
3.4.3. Escala dúplex	15
3.4.4. Teclado	15
3.4.5. Martillos	15
3.4.6. Sistema de cierre	15
3.4.7. Atril	16

3.5. Mecanismos del piano	16
3.5.1. Mecanismo de escape	16
3.5.2. Mecanismo de los pedales	18
3.6. Análisis de la mecánica del piano. Aspectos básicos de la acústica	19
3.6.1. Generación del sonido	19
3.6.2. Amplificación de sonido	20
3.6.3. Efectos de segundo orden. Rigidez no lineal del martillo	21
3.6.4. Acoplamiento entre cuerdas	21
3.6.5. Inarmonicidad	23
3.6.6. Modos resonantes en la tabla armónica	24
4. Materiales y métodos	25
4.1. Materiales de medición	25
4.1.1. Calibre	25
4.1.2. Cinta métrica	26
4.1.3. Galgas de radio	27
4.1.4. Transportador de ángulos	27
4.2. Software utilizado	28
4.2.1. Introducción a Software CAD	28
4.2.2. Campos de aplicación y funciones de las herramientas CAD/CAM	28
4.2.3. Algunos softwares de diseño asistido por ordenador	29
4.2.4. Software elegido: CATIA	30
5. Desarrollo del trabajo	35
5.1. Medición, modelado y ensamblaje de las piezas.	35
5.2. El teclado y su mecanismo	35
5.2.1. El teclado y mecanismo individual	35
	36
	45
5.2.2. El teclado y mecanismo conjunto	45
5.3. Los pedales y su mecanismo	49
5.4. El bastidor	51
5.5. El exterior	53
5.6. Análisis cinemático del mecanismo del teclado	58
5.6.1. Tecla	59
5.6.1. Pilotín y eje de escape	59
5.6.1. Nuez y macillo	59
6. Resultados	61
7. conclusiones. proyección del trabajo	65
Referencias	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Piano vertical KAWAI de la serie K [1].	1
Figura 2. Bartolomeo Cristofori [2].	5
Figura 3. Cítara [4].	6
Figura 4. Monocordio [3].	6
Figura 5. Clavecín [5].	6
Figura 6. Clavicordio [6].	6
Figura 7. Piano de Cristofori [7].	7
Figura 8. Tabla armónica [14].	10
Figura 9. Puente. Fuente: elaboración propia.	10
Figura 10. Cuerdas. Fuente: elaboración propia.	11
Figura 11. Bastidor (dorado). Fuente: elaboración propia.	12
Figura 12. Clavijero. Fuente: elaboración propia.	12
Figura 13. Teclado. Fuente: elaboración propia.	13
Figura 14. Tapa. Fuente: elaboración propia.	13
Figura 15. Caja [15].	14
Figura 16. Pedales. Fuente: elaboración propia.	14
Figura 17. Mecanismo de escape con sus componentes detallados [16].	16
Figura 18. Macillos (debajo) y apagadores (arriba). Fuente: elaboración propia.	17
Figura 19 Mecanismo básico del piano [20].	19
Figura 20. Detalle del mecanismo de la acción [20].	19
Figura 21. Propagación del pulso inicial y Análisis espectral del pulso viajero [20].	20
Figura 22. Diferencias en el espectro de los distintos niveles dinámicos [20].	21
Figura 23. Nivel de Presión sonora frente al tiempo [20].	22
Figura 24. Diferencias entre el decaimiento para una cuerda y dos cuerdas conectadas al mismo puente [20].	22
Figura 25. Modos resonantes en una tabla armónica [20].	24
Figura 26. Calibre o pie de rey [21].	25
Figura 27. Galgas de radio [23].	27
Figura 28. Transportador de ángulos [24].	27
Figura 29. Plano y medidas de tecla (Do ¹). Fuente: elaboración propia.	36
Figura 30. Plano y medidas del macillo. Fuente: elaboración propia.	36

Figura 31. Plano y medidas de apagador. Fuente: elaboración propia.	37
Figura 32. Ensamblaje de todas las piezas que forman el mecanismo de escape. Fuente: elaboración propia.	43
Figura 33. Detalle del ensamblaje de todas las piezas que forman el mecanismo de escape. Fuente: elaboración propia.	43
Figura 34. Detalle del mecanismo de percusión. Fuente: elaboración propia.	44
Figura 35. Teclado completo con mecanismo individual de cada tecla. Fuente: elaboración propia.	44
Figura 36. Teclado completo con mecanismo individual de cada tecla. Fuente: elaboración propia.	45
Figura 37. Mecanismo de teclas conjunto. Fuente: elaboración propia.	46
Figura 38. Mecanismo de teclas conjunto (vista trasera). Fuente: elaboración propia.	47
Figura 39. Ensamblaje del mecanismo de las teclas completo. Fuente: elaboración propia.	47
Figura 40. Ensamblaje del mecanismo de las teclas completo (vista trasera). Fuente: elaboración propia.	48
Figura 41. Ensamblaje del mecanismo de las teclas completo (perfil). Fuente: elaboración propia.	48
Figura 42. Mecanismos de los pedales. Fuente: elaboración propia.	50
Figura 43. Detalle de los mecanismos de los pedales. Fuente: elaboración propia.	50
Figura 44. Bastidor. Fuente: elaboración propia.	51
Figura 45. Cuerda y clavijero colocada en el mecanismo. Fuente: elaboración propia.	52
Figura 46. Cuerda y puente. Fuente: elaboración propia.	52
Figura 47. Tapa de las teclas. Fuente: elaboración propia.	53
Figura 48. Detalle de la tapa. Fuente: elaboración propia.	53
Figura 49. Sujeción 1.	54
Figura 50. Sujeción de la tapa. Fuente: elaboración propia.	54
Figura 51. Atril. Fuente: elaboración propia.	54
Figura 52. Bisagra. Fuente: elaboración propia.	
Figura 53. Bisagra larga. Fuente: elaboración propia.	54
Figura 54. Parte trasera y tabla armónica. Fuente: elaboración propia.	55
Figura 55. Tapas delanteras y superior.	55
Figura 56. Tapas laterales y patas. Fuente: elaboración propia.	56
Figura 57. Suelo.	56
Figura 58. Rueda.	56

Figura 59. Ensamblaje exterior. Fuente: elaboración propia	57
Figura 60. Ensamblaje exterior. Fuente: elaboración propia.	57
Figura 61. Esquema simplificado del mecanismo de una tecla. Fuente: elaboración propia.	58
Figura 62. Vista general (renderizada). Fuente: elaboración propia.	61
Figura 63. Vista general (renderizada). Fuente: elaboración propia.	62
Figura 64. Interior (renderizado). Fuente: elaboración propia.	63
Figura 65. Detalle mecanismo (renderizado). Fuente: elaboración propia.	63
Figura 66. Detalle teclado (renderizado). Fuente: elaboración propia.	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Modelado de la nuez paso a paso. Fuente: elaboración propia.	37
Tabla 2. Modelado del atril paso a paso. Fuente: elaboración propia.	40
Tabla 3. Piezas que conforman el mecanismo individual de cada tecla. Fuente: elaboración propia.	41
Tabla 4. Piezas del mecanismo conjunto. Fuente: elaboración propia.	45
Tabla 5. Piezas de los mecanismos de los pedales. Fuente: elaboración propia.	49

1 INTRODUCCIÓN. OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN

La presente Memoria forma parte del Trabajo de Fin de Grado (TFG) para la graduación en GITI del alumno Pablo Rodríguez de la Cruz, que se desarrolla bajo la dirección y supervisión de Dña. M^a Gloria del Río Cidoncha, profesora titular de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

El objeto del trabajo consiste en la medición y modelado mediante CATIA V5 de un Piano vertical de la marca KAWAI modelo K-25.

La elección del trabajo viene motivada por dos motivos principales: En primer lugar, este tipo de piano vertical es sin duda uno de los instrumentos musicales más complejos que existen, y lo es desde hace más de cien años. Es por ello que su modelación en 3D supone una gran opción para el trabajo. El segundo motivo que ha determinado la elección es la accesibilidad del mismo, así como de la posibilidad de despiezar las partes necesarias para realizar correctamente las mediciones, ya que al haber impartido el autor clases en el conservatorio Francisco Guerrero de Sevilla en la modalidad de piano, dispone de uno de su propiedad instalado en su domicilio que sirvió para su formación académica en el conservatorio de música.



Figura 1. Piano vertical KAWAI de la serie K [1].

2 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

Este documento pretende ser conciso, partiendo de la premisa de abordar el contenido con el máximo rigor, pero no siendo exhaustivo, sino apelando a la brevedad. Se estructura en los siguientes apartados:

2.1. Resumen

Breve descripción del trabajo y sus aspectos más relevantes.

2.2. Introducción

Breve descripción del objetivo del trabajo. Justificación de la elección de éste como Trabajo Fin de Grado y la estructura del mismo.

2.3. El piano como instrumento musical

Se realiza una presentación del piano como instrumento musical, con una breve referencia a sus orígenes, historia, evolución y tipos existentes, para finalizar con el Piano vertical, que es el tipo de piano que se va a medir y modelar a lo largo del trabajo, así como una descripción de los aspectos más importantes del mismo que es necesario conocer para una correcta comprensión de este proyecto como son:

- Las partes que lo componen.
- El mecanismo que posibilita su funcionamiento.
- Un análisis de la mecánica de este y su acústica como instrumento musical.

2.4. Materiales y métodos

En este apartado se describe el material metrológico y los métodos utilizados para llevar a cabo las mediciones de las distintas piezas que componen el piano, ya que no se han utilizado planos, sino que éstas han sido obtenidas mediante medición directa sobre el instrumento.

Por otra parte, se describe la herramienta informática utilizada para llevar a cabo el modelado de las distintas piezas una vez medidas y su posterior ensamblaje. En esta ocasión se ha utilizado CATIA, software muy utilizado en ingeniería y diseño de productos CAD en 3D.

2.5. Desarrollo del trabajo

Consiste en la medición de las distintas piezas que conforman el piano, así como su modelado en 3D mediante CATIA V5.

Estas piezas se contabilizan por miles (solo mencionar que el piano cuenta con 88 teclas, y por cada una de ellas existe un complejo mecanismo compuesto a su vez por decenas de piezas, existiendo además pequeñas variaciones entre los mecanismos de distintas teclas, en cuanto a grosor, diámetro, inclinación de los componentes, etc.), además de las demás piezas exteriores como la caja de resonancia, los pedales, la tabla armónica, etc.

Al mismo tiempo que se han ido modelando las piezas se han ido ensamblando para verificar su correcta distribución en el conjunto y su aplicabilidad.

2.6. Resultados

Una vez llevado a cabo todo el modelado y posterior ensamblaje, se ha procedido a completar la memoria con los resultados obtenidos.

Por último, se ha de llevar a cabo la preparación de la presentación del Trabajo y se realizará mediante exposición oral del autor apoyada en visualizaciones del proceso de ejecución y el resultado final.

2.7. Conclusiones. Proyección del trabajo

En este último apartado se desarrollan las conclusiones del trabajo y se analizan posibles continuaciones del trabajo y la proyección que puede tener este para futuras aplicaciones.

3 EL PIANO COMO INSTRUMENTO MUSICAL

El piano es un instrumento musical armónico clasificado como instrumento de percusión y de cuerdas percutidas por el sistema de clasificación tradicional. El piano se toca presionando una o varias teclas simultáneamente. Las teclas blancas emiten los sonidos de las notas naturales, que son los siete sonidos conocidos como “Do”, “Re”, “Mi”, “Fa”, “Sol”, “La” y “Si”, y las teclas negras corresponden a las mismas notas alteradas cromáticamente, y son “Do#”, “Re#”, “Fa#”, “Sol#” y “La#”, o bien “Reb”, “Mib”, “Solb”, “Lab” y “Sib” respectivamente. El nombre de estas dependerá del tipo de escala que se esté utilizando. Al pulsar una tecla se activa un mecanismo por el cual unos martillos se encargan de golpear las cuerdas que hay dentro de la caja de resonancia y de esta forma se emite su característico sonido. También se encuentran varios pedales que actúan como modificadores del mecanismo para determinadas situaciones.

3.1. Breve historia y evolución. Tipos de piano. Piano vertical

La aparición del piano como tal es bastante reciente en la historia de la música. Data del siglo XVIII y fue desarrollado por Bartolomeo Cristofori (Padua, 4 de mayo de 1655-Florence, 27 de enero de 1731) a partir del clavicémbalo.

Se diferencia de sus predecesores por su capacidad de producir sonidos con distintas intensidades.



Figura 2. Bartolomeo Cristofori [2].

Sin embargo, su origen es mucho más antiguo ya que es producto de la evolución de diferentes instrumentos musicales.

Su nombre actual es un apócope o acortamiento del término en italiano *pianoforte* (*piano*: suave y *forte*: fuerte.) y procede del nombre que el creador del piano moderno Bartolomeo Cristofori dio a este instrumento: *clavicembalo col piano e forte*.

Ya en la Edad de Bronce (aprox. 3000 a. C.), tiene su origen el instrumento musical de cuerda más antiguo relacionado con el piano es *la cítara*.

Su procedencia es de África y del sudeste de Asia. Comprende un conjunto de cuerdas tensadas colocadas sobre una caja de resonancia de madera similar a la de una guitarra. De ahí que la palabra “guitarra” provenga de cítara.

El siguiente instrumento conocido en la línea evolutiva del piano es *el monocordio*.

Es un instrumento que dispone de una única cuerda larga que se hace vibrar sobre una caja de resonancia de madera.

Al parecer algunos matemáticos griegos, como Pitágoras y Euclides, utilizaron este instrumento para llevar a cabo estudios sobre geometría y sobre las relaciones entre intervalos musicales.



Figura 4. Monocordio [3].



Figura 3. Cítara [4].

Durante la Edad Media y el Renacimiento, se desarrollaron diferentes instrumentos de teclado con cuerdas percutidas, como la zanfona y el escaque y posteriormente estos instrumentos de cuerda percutida evolucionaron en *el salterio*, que se diferencia de los anteriores por su forma trapezoidal y sus cuerdas de diferentes longitudes. El objetivo de los creadores de estos instrumentos era lograr que las cuerdas no fueran percutidas con los dedos sino con algún mecanismo.

De esta forma el salterio dio lugar al *clavecín* y, más tarde, al *clavicordio*, con un mecanismo mucho más próximo al piano. Ambos instrumentos eran muy populares en el siglo XVII.



Figura 5. Clavecín [5].



Figura 6. Clavicordio [6].

El nuevo instrumento mantendrá la forma del clavecín y su mecanismo es muy simple: la cuerda es golpeada por un macillo articulado y recubierto de piel, el cual regresa nada más producido el ataque (escape), preparándose para golpear de nuevo y dejando vibrar la cuerda libremente.

Cuando se levanta el dedo de la tecla, el apagador se encarga de extinguir el sonido. Asimismo, introdujo el mecanismo “*una corda*” (similar al pedal izquierdo actual) pero accionado con la mano.

El piano terminaría desplazando gradualmente tanto al clavicordio como al clavecín a finales del siglo XVIII.

De esta forma se podría decir que el origen del piano fue producto de la necesidad de conjuntar las ventajas del clavicordio y el clavecín en un solo instrumento.



El clavicordio fue muy influyente en la ejecución de la música debido a la capacidad de la acentuación y el estilo de canto. Sin embargo, su tono era débil. Por otra parte, el clavecín ofreció un tono fuerte y refulgente.

El piano llegó a conjuntar las peculiaridades de estos 2 instrumentos de clave en torno a 1709. Lo que haría singular al nuevo instrumento de teclado fue el tono expresivo, la resonancia y la enorme pluralidad en el tono de la fuerza.

Bartolomeo Cristofori, lo que realmente hizo fue una mejora en el mecanismo del clavicordio. Reemplazó las púas del clavecín con martillos y añadió amortiguadores. Llamó a este instrumento "*clavicembalo col de piano y también forte*" lo que significa una "clavecín con suave y fuerte."

Figura 7. Piano de Cristofori [7].

Al contrario de lo que ocurría con la clave y el clavicordio, en este nuevo instrumento pulsando una tecla con un dedo el martillo afectaría la cadena y después dejaría que vibrase. La vibración habría llegado a su fin tan pronto como la clave fue puesto en libertad debido al mecanismo de amortiguadores. De esta forma, con el piano un músico podría tocar suave o bien realmente fuerte, veloz o bien gradual, y de esta forma transmitir sus emociones a través del instrumento.

Cristofori fue un experto creador de clavicémbalos familiarizado con las técnicas de fabricación de instrumentos de cuerda con teclado. Su interés era encontrar un mecanismo que no amortiguase el sonido, y dio con la solución: diseñó un macillo que tras golpear las cuerdas volvía a su posición original sin permanecer en contacto con ellas y sin rebotar. De esta forma, además, era posible repetir una misma nota con rapidez.

Antes de crear su primer piano, a lo largo de sus años como artesano Cristofori inventó otros dos instrumentos de teclado: el *spinettone* y el *spinettone ovale*. Aunque no se conoce con certeza la fecha de fabricación de su primer piano, hacia 1698 Cristofori ya trabajaba en la creación de este instrumento. En algunos escritos consta la existencia de un piano en el año 1700 por lo que se considera este al año de su creación.

Gracias a un artículo publicado por Francesco Scipione en el *Giornale de' Letterati d'Italia* se dió a conocer en 1711 el primer piano de Cristofori. En dicho artículo Scipione alababa y describía con detalle las características de este instrumento, que al principio no tubo gran aceptación.

Ya por 1726, Cristofori introdujo en el sistema una corda, presente en los pianos actuales, que daba la posibilidad de desplazar el mecanismo para que cada macillo golpeará una cantidad de cuerdas menor de lo habitual, con lo que se conseguía un sonido muy suave. El sistema de escape permitía variar el volumen y el timbre. Así, el piano se convirtió en un instrumento de gran capacidad expresiva, que podía producir sonidos con un tono más dulce, o de gran volumen y muy brillantes.

Hasta llegar a Silbermann, que inventó el precursor del pedal de resonancia actual, las generaciones posteriores de fabricantes de pianos se limitaron a crear copias del instrumento, salvo ligeras variaciones.

El piano como instrumento musical desde su invención en 1700 sufrió varias transformaciones, de acuerdo con las necesidades y exigencias de los músicos. Bartolomeo Cristofori fabricó 20 pianos antes de su muerte, y el primer recital de piano abierto al público en la historia ocurrió en 1768, interpretado por Johann Christian Bach, hijo de Johan Sebastian Bach.

Cristofori introdujo el concepto de piano moderno, que sirvió de base para introducir mejoras en los siglos posteriores, tanto en materiales y diseño como en número de notas. El momento cumbre de la fabricación de pianos tuvo lugar a finales del siglo XVIII, con fabricantes como Johann Andreas Stein, Nannette Streicher y Anton Walter.

Con la Revolución industrial los avances tecnológicos supieron dar respuesta a las preferencias de los compositores y pianistas con la introducción de importantes modificaciones que consiguieron un sonido más poderoso y sostenido.

Durante los siglos XVIII y XIX varios modelos de pianos se fabricaron: el piano cuadrado horizontal (Tafelklevier) a imitación de la espineta o el clavicordio; el piano de cola (Flügel) imitando el Kielflügel; el piano piramidal, que toma la forma del piano de cola pero en vertical. A partir del siglo XIX se empieza a fabricar el pianino, con la forma de un piano vertical habitual.

A lo largo del siglo XIX se fundaron numerosas compañías de fabricación de pianos. En 1828, se fundó Bösendorfer en Austria. El año 1853 supuso un hito en el desarrollo de pianos, cuando el alemán Heinrich E. Steinweg emigró a Estados Unidos, donde fundó la marca Steinway & Sons. En 1855 esta compañía exhibió en Nueva York un piano de cola al que presentaron como el piano más preciso construido hasta la fecha. [8]

Steinway & Sons es hoy por hoy la marca más prestigiosa de pianos.

3.2. El piano en la actualidad

Al hablar de pianos modernos nos referimos concretamente a aquellos diseñados y fabricados desde la última década del siglo XX hasta el presente. Los pianos construidos en este periodo, a pesar de ser un periodo amplio, pueden agruparse como pianos contemporáneos ya que las variaciones del diseño y de los materiales usados son mínimas.

Actualmente, los mecanismos existentes son muy diversos, si bien comparten algunas características comunes. Se empezaron a usar cuerdas más gruesas con una tensión mayor, de hasta 18 toneladas, por lo que se empezaron a construir pianos de forma masiva con marcos de hierros de fundición. Asimismo, el piano moderno posee dos pedales: el derecho para levantar los apagadores y el izquierdo para la ejecución en sordine. En el piano vertical, esto se consigue acortando el mecanismo de percusión; en el piano de cola, se desplazan los martillos hacia la derecha: de esta manera sólo golpean una o dos cuerdas, que se disponen en números de dos o tres por nota respectivamente. Existen algunos pianos que poseen un tercer pedal entre los dos estándares llamado pedal sostenido, el cual se usa para sostener los tonos cuyos apagadores se encuentran elevados por el mecanismo de las teclas.

El teclado actual se compone de 88 teclas: 36 negras y 52 blancas. [9]

En la actualidad podemos encontrar los siguientes tipos de piano:

3.2.1. Piano de Cola

Un piano de cola es un tipo de piano en el que las cuerdas y la caja de resonancia se encuentran en posición horizontal.

Los pianos de cola tienen una tapa superior que se puede abrir, de manera que los sonidos producidos por las cuerdas salen sin barreras de ningún tipo.

Su tamaño puede variar dependiendo del fabricante y tipo de piano de cola fabricado. Se pueden encontrar el piano de cola mignon (es el más pequeño de los pianos horizontales), un cuarto de cola, media cola, tres cuartos de cola y el de gran cola [10].

3.2.2. Piano vertical o de pared

En 1795 se desarrolla en Londres el primer piano vertical. Su diseñador era William Stodart. El piano vertical se caracteriza por tener las cuerdas, los macillos y la caja de resonancia en posición vertical, perpendicular al suelo.

De modo general se pueden dividir entre cuatro tipos distintos dependiendo de su tamaño [10]:

3.2.2.1. Piano vertical espineta

El más pequeño en su categoría con un sonido característico, piano de máquina indirecta (quiere decir que el mecanismo se encuentra por debajo del teclado). Su altura es menor a 98 cm.

3.2.2.2. Piano vertical consola

Son pianos de máquina directa, es decir, el mecanismo está al mismo nivel del teclado. De 98 a 109 cm de altura.

3.2.2.3. Piano vertical de estudio

Son pianos de máquina directa, con el mecanismo un poco más elevado del nivel del teclado. Esta característica proporciona al intérprete una mayor seguridad. De 110 a 139 cm de altura.

3.2.2.4. Piano vertical antiguo

Poseen una gran capacidad acústica de máquina directa aún más elevada que el piano de estudio. Su medida de altura es muy variable dependiendo del fabricante, pero suele tener más de 140 cm de altura. [10]:

El modelo utilizado para este trabajo es un KAWAI K-25 que se clasificaría como Piano vertical de estudio.

3.2.3. Piano electrónico

El piano más moderno es el **electrónico**, referente al siglo XX, donde los sonidos que se van generando son por síntesis electrónica. Al ser los más modernos, pueden simular sonidos de otros instrumentos [10].

3.3. Partes del piano

El piano moderno apenas ha evolucionado desde finales del s. XIX y mantiene en esencia las mismas características. Su estructura general está formada por un bastidor metálico, que mantiene la tensión del conjunto de cuerdas, la tabla armónica, encargada de transmitir y amplificar las ondas producidas por las mismas, un mecanismo accionado por teclas, que realiza la percusión de las cuerdas, y una caja o mueble exterior.

En los pianos de cola todo el conjunto se encuentra en horizontal, reposando sobre unas patas, mientras que en los pianos verticales se encuentra perpendicular al suelo.

A continuación, se exponen las partes más relevantes de un piano moderno:

3.3.1. Tabla armónica

Es el verdadero elemento de resonancia del instrumento. Sin ella una cuerda no produciría más que un sonido pobre. La calidad y homogeneidad de la madera de la que está hecha son primordiales. Su función es transmitir y amplificar la onda sonora producida por la vibración de las cuerdas [11]. Va colocada debajo o detrás de las cuerdas y en paralelo a éstas.

Está formada por láminas de madera (generalmente de abeto) de 8 mm de grosor y unos 10 cm de ancho, encoladas lateralmente siguiendo la dirección de las vetas, de modo que éstas queden paralelas. [12]

La tabla armónica no es plana, sino convexa en su zona central, ya que de esta forma favorece la resonancia, pero debido a la tensión de las cuerdas esta curvatura casi es imperceptible a primera vista. Adosadas a la tapa armónica están las costillas que a modo de traviesas aseguran su curvatura y la estabilidad de la tensión interior de la madera. Se encuentran encoladas a la tapa en sentido perpendicular a las vetas, lo que contribuye a repartir la resonancia en todas las direcciones. [13]



Figura 8. Tabla armónica [14].

3.3.2. Puente

Es la parte del piano donde las cuerdas son tensadas y se encarga de transmitir la energía vibratoria de las cuerdas a la tapa armónica [12]. Se divide en dos secciones, una para la región grave y otra para el resto, debido a la disposición cruzada del encordado, aproximando la mayor parte del puente al centro de la tabla armónica, lo que mejora la calidad de la vibración sonora. [13]



Figura 9. Puente. Fuente: elaboración propia.

3.3.3. Cuerdas

Las cuerdas se encuentran dispuestas en abanico, de modo que se abren desde el clavijero hasta el puente, con el fin de amplificar la sonoridad del piano. [12]

En total son 224, y la tensión a la que se someten por su afinación llega hasta los 75 kg., alcanzando en su conjunto del orden de 15 a 20 toneladas. Están compuestas de acero duro al carbono (0,7 al 0,8 % de carbono) y mediante una técnica que se conoce con el nombre de trefilado, que permite obtener hilos finos por el hecho de pasar sucesivas veces hilos más gruesos por una hilera.

Las cuerdas del extremo grave, las de mayor longitud, también llamadas bordones, son de acero hilado en cobre, y se disponen individualmente. En el registro grave se colocan dos por tecla, y en el resto tres. Estas últimas sólo son de acero. La longitud y grosor son directamente proporcionales a la gravedad de la cuerda, es decir, a tonos graves, mayor grosor y longitud, y a tonos agudos, menor grosor y longitud. Por ello, si examinamos visualmente un piano por dentro se aprecia a simple vista la gran longitud de las cuerdas situadas hacia la izquierda, mientras que las de la derecha son casi diminutas, y también se aprecia que en una determinada nota las cuerdas comienzan a tener un recubrimiento de cobre para aumentar el grosor. [13]

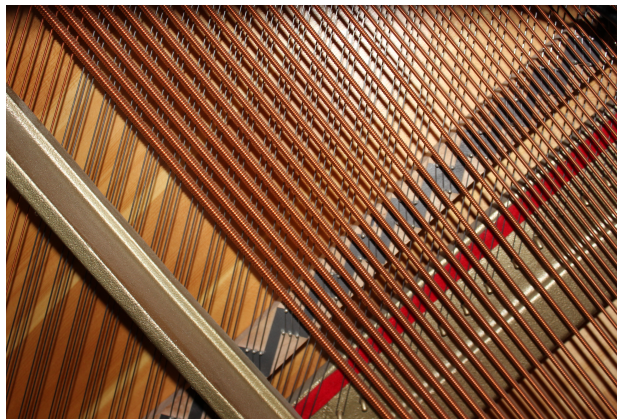


Figura 10. Cuerdas. Fuente: elaboración propia.

3.3.4. Bastidor

También llamado marco, arpa o placa de hierro. Es la columna vertebral del piano; y soporta la tensión de las cuerdas, que como ya hemos dicho puede alcanzar las 15 a 20 toneladas.

Está construido en una sola pieza de hierro, por ser el metal que menos se contrae al enfriarse tras la fundición, por lo que mantiene su estructura y dimensiones con la mayor fiabilidad. Está recubierto con una capa de bronce y varias de laca.

Su construcción original se hacía en madera, pero el aumento de tensión de las cuerdas obligó a incorporar sucesivos refuerzos de metal, hasta que en 1856 Steinway lo construyó fundido en una sola pieza lo que permitió ganar en sonoridad y una afinación más duradera. [13]



Figura 11. Bastidor (dorado). Fuente: elaboración propia.

3.3.5. Clavijero

Está construido con láminas de madera maciza (generalmente haya), distribuidas una por encima de otra y en él se insertan las clavijas de afinación. Deben resistir una gran presión, asegurando la estabilidad de la afinación e impidiendo cualquier variación en la posición de las clavijas.

Las clavijas son pequeños cilindros metálicos en donde se enganchan las cuerdas. Desde su parte superior son manipuladas por llaves especiales para la afinación del piano. Se insertan en el clavijero con una ligera inclinación de 10°. [13]



Figura 12. Clavijero. Fuente: elaboración propia.

3.3.6. Teclado

Fabricadas en madera de tilo, haya o abeto, está compuesto por un total de 88 teclas (el Bösendorfer modelo Imperial constituye una excepción al abarcar ocho octavas, es decir, 96 teclas).

Las teclas del registro grave llevan incorporados unos cilindros de plomo con el fin de compensar el mayor peso de los macillos de la región grave e igualar el peso de todo el teclado, que suele oscilar entre los 48 y los 68 gramos. [13]



Figura 13. Teclado. Fuente: elaboración propia.

3.3.7. Tapa

Tiene la función no sólo de cerrar el mueble, sino también proyectar el sonido al público. Tiene diversas posiciones según la potencia solicitada: para un concierto solista debe estar en su posición más alta, en cambio, acompañando a otros instrumentos se debe situar en la más baja. [13]



Figura 14. Tapa. Fuente: elaboración propia.

3.3.8. Caja

La caja, o mueble, prolonga la función de la tapa armónica. En los pianos de cola está reforzada por un barrado para sostener el peso del bastidor. [13]



Figura 15. Caja [15].

3.3.9. Pedales

En los pianos de cola suelen ser tres [13]:

3.3.9.1. Pedal fuerte o de resonancia (derecho)

Al pisarlo permite que el sonido de las distintas cuerdas se prolongue una vez la tecla se ha dejado de pulsar, permitiendo la libre resonancia de las cuerdas.

3.3.9.2. Pedal celeste (izquierdo)

Su objetivo es obtener sonidos más débiles y diferente timbre al resonar la cuerda no percutida por simpatía (Fenómeno que se detallará más adelante).

3.3.9.3. Pedal tonal (central)

Sólo existe en los pianos de cola y funciona igual que el pedal derecho, pero afectando únicamente a las cuerdas que se encontraran bajadas en el momento de accionar el pedal. Es posible ver un tercer pedal en los pianos verticales, pero su función cambia completamente sirviendo únicamente para activar la sordina.



Figura 16. Pedales. Fuente: elaboración propia.

3.4. Piano Kawai K-25

El piano a partir del cual se va a realizar el modelado es el modelo K-25 de la marca Kawai, una marca japonesa caracterizada por llevar más de 40 años ofreciendo una gran variedad de modelos de piano de todo tipo, a un precio medio, que ofrecen una gran calidad de sonido.

La empresa Kawai fue fundada por Koichi Kawai. En los inicios de 1927 estableció su primer taller junto a un laboratorio de investigación llamado “Kawai Musical Instruments Research Institute”. Partiendo de los principios fundamentales en torno a la calidad de los instrumentos, el amor por la música y la constante búsqueda de la excelencia. Estos principios han permitido que hoy en día Kawai sea una empresa líder en la venta de pianos y con un gran reconocimiento [17].

Kawai ha sido y es uno de los fabricantes que más innovaciones ha incorporado a sus pianos. Ha sido criticado por algunos sectores por la introducción del “plástico” en algunos de sus componentes, como por ejemplo, en la palanca de escape, que como ya se ha mencionado, se trata de una pieza clave en el mecanismo, pero este criticado “plástico” no es más que el fruto de muchos años de investigación con aleaciones de materiales sintéticos con fibras de carbono, obteniéndose así unas piezas muy resistentes, que se adaptan perfectamente a la maquinaria y con una gran resistencia a fatiga [18].

3.4.1. Modelos verticales. Serie K

Los pianos de la serie K constituyen los pianos verticales fabricados por Kawai. Se caracterizan por poseer una gran calidad tonal y por el funcionamiento de su mecánica, compitiendo incluso con pianos de cola. Su sólida construcción le proporciona una larga vida útil y es una opción ideal para estudiantes, profesionales, escuelas y otro tipo de escenarios. A continuación, se presentarán algunas características de sus componentes [17]:

3.4.2. Tabla armónica

Las tablas armónicas de la serie K están hechas de madera maciza y aserrada cuidadosamente escogida. El área de caja de resonancia, las longitudes de cuerda y el número de costillas se maximizan para superar las especificaciones de otros pianos y proporcionar una mayor potencia y resonancia [17].

3.4.3. Escala dúplex

La escala dúplex mejora los armónicos en la sección de agudos y añadir brillo y riqueza al sonido del piano [17].

3.4.4. Teclado

Las teclas están recubiertas de una fibra de celulosa, que ofrece una textura suave y cálida del marfil y el ébano natural. Además, el tacto es semiporoso y está cargado con sílice para absorber los aceites naturales de la mano y el sudor [17].

3.4.5. Martillos

Los martillos están compuestos de caoba por su alta relación resistencia-peso [17].

3.4.6. Sistema de cierre

Poseen un sistema de amortiguación en la tapadera de las teclas que protege tanto las manos como el propio piano de los daños que pudiera causar un cierre brusco [17].

3.4.7. Atril

Todos los modelos de la serie K tienen un atril amplio que puede admitir varias partituras. El cuero simulado de la superficie del atril evita que se deslicen las partituras [17].

3.5. Mecanismos del piano

En los siguientes epígrafes vamos a detallar los diferentes componentes de los mecanismos del piano y explicar acerca de su funcionamiento:

3.5.1. Mecanismo de escape

El mecanismo del piano, aunque puede parecer muy simple, es en realidad un complejo conjunto de palancas con miles de piezas que llevan el impulso de la tecla al macillo para que éste pueda golpear las cuerdas [19].

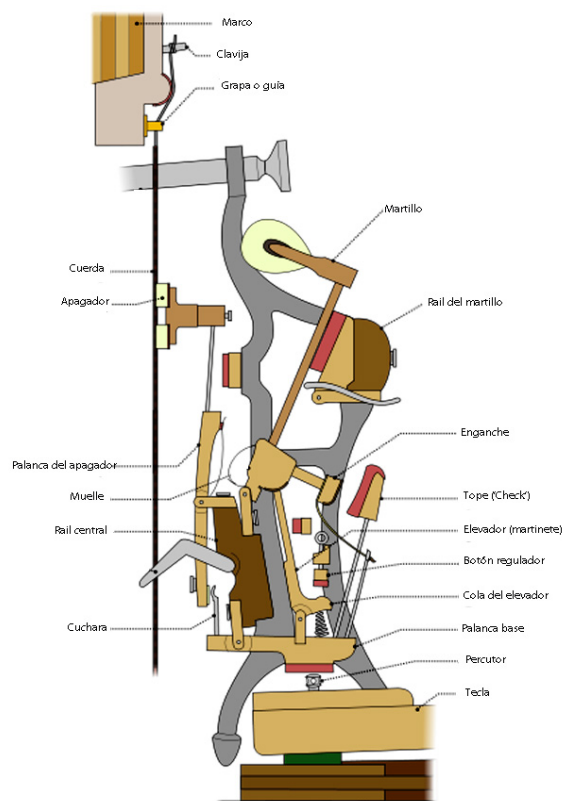


Figura 17. Mecanismo de escape con sus componentes detallados [16].

De entre estas piezas destacaremos dos tipos:

3.5.1.1. Macillos

Encargados de la percusión, se hallan debajo de las cuerdas y su superficie está recubierta de fieltro duro, lo que prolonga ligeramente el contacto entre ellas y las cuerdas, eliminando los parciales transitorios de orden elevado (disonantes) [19].

3.5.1.2. Apagadores

Son unos pequeños trozos de madera recubiertos de paño en su parte inferior que se apoyan en las cuerdas. Mediante unas palancas, al pulsar las teclas (o también al pisar el pedal derecho) se separan de las cuerdas dejándolas vibrar libremente, y una vez que subimos la tecla (o soltamos el pedal) el apagador correspondiente se posaría otra vez sobre las cuerdas, impidiendo su vibración [19].



Figura 18. Macillos (debajo) y apagadores (arriba). Fuente: elaboración propia.

Cuando se pulsa una tecla, la parte opuesta asciende, elevando la palanca de escape y la palanca de repetición. Dicha palanca de escape empuja al rodillo (que a su vez presiona el martillo, que comienza a elevarse) frenándose al entrar en contacto con el pilotín. La palanca comienza entonces a deslizarse por el rodillo, y una vez que se separa de este tanto el martillo como la palanca de repetición suben rápidamente, permaneciendo ésta última elevada de tal manera que tras la percusión se encarga de sujetar el macillo, que cae, pero sólo en parte, permaneciendo de esta manera el macillo más próximo a las cuerdas lo que permite aligerar la velocidad de repetición. Mientras, la palanca de escape ha vuelto a su posición inicial debajo del rodillo, preparándose para una nueva percusión. Una vez que levantada la tecla, todas las piezas volverían a su posición inicial, bien por efecto de la gravedad o bien por medio de distintos resortes. [13]

Se tiene, por tanto, una caja de resonancia y un arpa con múltiples cuerdas. El mecanismo que las hace vibrar es muy preciso, pero su principio básico no ha cambiado en su fundamento desde los inventos de Erard. El efecto tímbrico del sonido se manifiesta por una percusión bastante corta, seguida de una resonancia larga, cuyo color y curva de sonido dependen en gran manera de la tapa armónica. Por tanto, el mecanismo se dirige a controlar lo mejor posible estas dos dimensiones: percusión y resonancia.

Se golpea la cuerda con un macillo de fieltro duro. Éste comunica velocidad a la cuerda: si va rápido, la vibración será importante y el sonido se escuchará fuerte; si va lento, la cuerda vibrará con menos amplitud y el sonido será débil. El impacto entre el macillo y la cuerda es siempre muy breve, ya que rebota. Una vez la cuerda entra en vibración apoyada por la tapa armónica produce el sonido, realzado en belleza por las cuerdas más cortas y agudas, que al no llevar apagador entran en resonancia. Si además levantamos todos los apagadores con el pedal derecho, la resonancia antes citada se aplica a todas las cuerdas del piano, con lo que el sonido se incrementa en potencia y belleza. Una vez la tecla ha sido pulsada se pueden realizar tres acciones:

- Levantarla a medio camino y volverla a presionar, con lo que repetimos el sonido sin cortarlo.
- Levantarla totalmente con lo que el apagador vuelve a su posición de reposo y extingue definitivamente la vibración de la cuerda.
- Simplemente, esperar a que se extinga el sonido por sí solo, es decir, no levantar la tecla [11].

3.5.2. Mecanismo de los pedales

3.5.2.1. Pedal fuerte o de resonancia (derecho)

El pedal derecho, también conocido como pedal fuerte o de resonancia, permite, como ya se ha mencionado, levantar todos los apagadores al mismo tiempo. Esto añade a la resonancia de las cuerdas en vibración, la de toda la tapa armónica y de las cuerdas que reaccionan por simpatía, es decir, entran en relación concomitante con la nota tocada, siendo las más audibles las que están a distancia superior de octava, quinta, tercera y séptima. Para entender claramente qué es la vibración por simpatía se puede realizar el siguiente experimento: Al tocar fuertemente una nota, por ejemplo, el “Do”. Antes de que se extinga el sonido (hay tiempo suficiente para hacerlo), se bajaría muy lentamente la tecla de la nota “Do²” evitando que el macillo obtenga velocidad e impulso para golpear la cuerda y por tanto no debería entrar en vibración, pero, al levantar la tecla “Do” no se obtendría silencio, sino que se percibiría claramente el sonido de la tecla “Do²” que está resonando por simpatía. El pedal fuerte añade, pues profundidad de sonido y asume en cierta forma el papel de cámara de reverberación, coloreando y alejando la fuente. Por tanto, no es exacto llamarlo pedal “amplificador”, sino más bien, pedal de resonancia [11].

3.5.2.2. Pedal celeste (izquierdo)

El pedal celeste (situado a la izquierda) modifica el timbre: todo el mecanismo del piano se desplaza y esto es claramente visible desde el exterior.

Esto provoca que el macillo, en vez de golpear las tres cuerdas, sólo golpee dos o incluso una según la calibración. Esto produce un primer efecto de disminución de la potencia sonora, y un segundo en la alteración del timbre: ya que la tercera cuerda entrará en vibración por simpatía. En los registros donde hay dos cuerdas, sólo se golpea una y, donde hay una, también obtenemos una disminución del sonido, ya que la zona del macillo que golpea la cuerda estará algo menos castigada por el uso, es decir, es más blanda y por tanto la percusión más suave. Tenemos que advertir que en el piano vertical no se da esta cualidad, tan sólo se acercan los macillos a las cuerdas para que al tener menor recorrido de ataque percutan con menor intensidad, por tanto, el timbre no varía en este caso.

En los pianos verticales este pedal también sirve para atenuar el sonido, pero la vía que se toma para obtenerlo es distinta. En este caso al accionar el pedal, los macillos se acercan simultáneamente a las cuerdas reduciendo el trayecto, lo que provoca menor velocidad y por tanto menos sonido [11].

3.5.2.3. Pedal tonal (central)

El tercer y último pedal, el central, o más exactamente pedal tonal, solo existe en los pianos de cola, y no en todos ellos. Su función es mantener en alto los apagadores de solo las teclas que estén bajadas, es decir, pulsamos do¹, pisamos el pedal tonal y a partir de ese momento podemos soltar nuestra tecla, que seguirá sonando independientemente incluso del uso del pedal fuerte. Se suele utilizar para prolongar sonidos bajos cambiando la armonía en los más agudos.

En los pianos verticales, si existe este pedal su función consiste en colocar una tela de unos 2 mm de grosor entre los macillos y las cuerdas de forma llamada sordina, de forma que se reduce drásticamente la intensidad del sonido, a costa de una peor calidad de este [11].

3.6. Análisis de la mecánica del piano. Aspectos básicos de la acústica

Una vez mostradas las principales partes del piano, se va a realizar un análisis de la mecánica del piano: cómo se produce el sonido, qué mecanismos influyen en el tipo de sonido y una justificación de la geometría y los materiales utilizados para los diferentes componentes que se emplean.

El sonido es producido por las cuerdas, que están compuestas de acero. Cada una de ellas se enrolla por uno de sus extremos alrededor de una clavija y por el otro está sujeta al bastidor mediante unas puntas de sujeción. Próximas a las puntas de sujeción se encuentra el puente, que está unido a la tabla armónica. La altura del puente ligeramente mayor que la terminación de la cuerda, por lo que causa una presión contra la tabla de armonía.

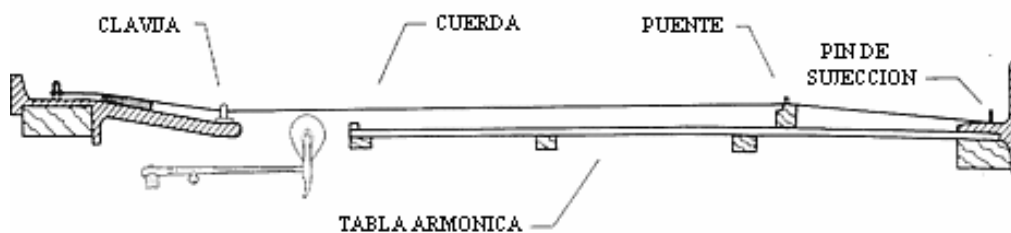


Figura 19 Mecanismo básico del piano [20].

La cuerda es golpeada por un macillo, que se eleva una vez pulsada la tecla mediante el antes mencionado mecanismo de acción. Este siempre golpea a la cuerda en una posición cercana al clavijero, generalmente oscila entre $1/7$ y $1/9$ de la longitud de la cuerda si tomamos como origen la clavija. Cuanto menor sea esa distancia más débil será el sonido, ya que el primer armónico tendrá menos energía. No obstante, aumentarla demasiado puede provocar un tono borroso y poco claro [20].

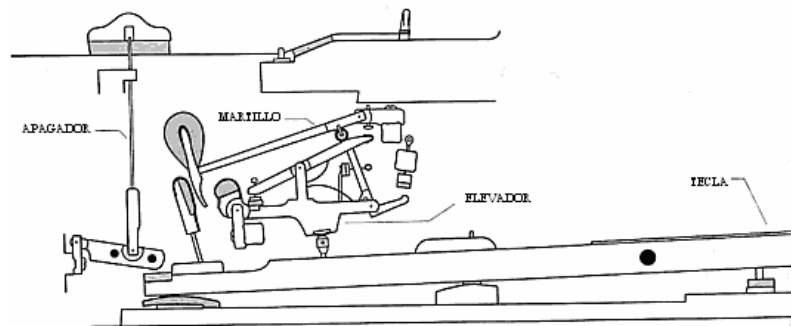


Figura 20. Detalle del mecanismo de la acción [20].

3.6.1. Generación del sonido

Una vez que la cuerda ha sido golpeada por el macillo, ésta se deforma en el punto de colisión y aparecen dos ondas en la cuerda que viajarán en direcciones opuestas. Estas ondas se reflejan en la clavija al considerarse ésta una terminación rígida, y de esta forma se invierte el sentido de la onda y cuando llega al puente sufre de nuevo una reflexión y así sucesivamente. El tiempo de ida y vuelta del pulso por la cuerda la determina la longitud de la cuerda y la velocidad de propagación en el medio.

La velocidad de propagación del pulso en la cuerda la determina la tensión a la que está sometida la cuerda (a mayor tensión mayor velocidad) y la masa longitudinal de la cuerda (a más ligera mayor velocidad). La frecuencia fundamental de la onda resultante queda determinada también por la tensión y la masa longitudinal de la cuerda, y además por la longitud de ésta. Para reducir el tamaño del instrumento se suele aumentar la densidad de la cuerda para poder reducir la longitud. Esto se suele llevar a cabo con las notas más graves, es decir, las notas con menor frecuencia, ya que requieren de una longitud excesiva. Por ello, para aumentar la masa de la cuerda y de esta forma disminuir la longitud, las cuerdas graves poseen un hilado en cobre.

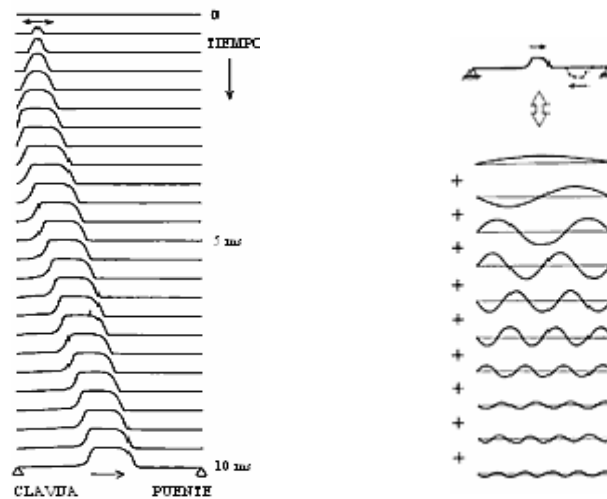


Figura 21. Propagación del pulso inicial y Análisis espectral del pulso viajero [20].

La onda que recorre la cuerda puede descomponerse en la suma de sus armónicos. El armónico fundamental, cuya longitud de onda es el doble de la longitud de la cuerda, determina la frecuencia del tono percibido. Los armónicos secundarios se encargan de dar el timbre característico del sonido del piano. En los pianos reales, las frecuencias de resonancia no son exactamente armónicas, lo que provoca que la relación entre los armónicos no sea proporcional. Por tanto, la vibración de la cuerda no será del todo periódica, lo que lejos de ser un problema, le confiere al instrumento un sonido menos mecánico, y por tanto, más natural [20].

3.6.2. Amplificación de sonido

Una cuerda vibrando no puede por sí misma generar un sonido eficaz. Para que ésta lo haga necesita de un mecanismo amplificación. En un piano, este mecanismo es la tabla armónica o tabla de resonancia, y como se ha comentado antes, está conectada a las cuerdas a través del puente. Sin embargo, al ser la tabla armónica mucho más pesada que la cuerda, la cuerda no podrá hacer vibrar la tabla de resonancia y la energía quedaría atrapada en la cuerda.

Lo que ocurre, en términos ingenieriles, es que existe una desadaptación de impedancias entre la cuerda y la tabla. Para la cuerda la tabla tiene una gran impedancia de entrada, así que para adaptar las impedancias habría que aumentar la impedancia mecánica de la cuerda. Esto se puede lograr haciendo la cuerda más pesada o bien incrementando la tensión. Entonces, el recubrimiento de cobre para las cuerdas con tonos más graves tendría doble efecto, el de reducir la longitud de la cuerda y el de adaptar las impedancias. Para el resto de las cuerdas la solución que se toma es usar para cada nota dos o tres cuerdas afinadas a la misma frecuencia. De esta forma, se consigue aumentar la energía transferida y por tanto el volumen sonoro.

Un efecto directo de la amplificación sonora es que reduce la duración del sonido, por tanto, a más se ajusten las impedancias de la cuerda y la tabla armónica, el tono obtenido tendrá un mayor volumen, pero una menor duración. Este hecho es difícil de conciliar, ya que la impedancia de la tabla de resonancia puede variar bruscamente de nota a nota [20].

3.6.3. Efectos de segundo orden. Rigidez no lineal del martillo

Otro efecto a destacar es que, al ser excitada una cuerda por el golpe del martillo, no solo la amplitud del pulso cambia con la fuerza del impacto, sino también la forma del mismo. Esto significa que una nota tocada más fuerte (en forte) no solo es una versión amplificada de la nota. Esto tiene consecuencias muy importantes en la síntesis digital del sonido del piano. Por ello, en los pianos digitales de mayor calidad, se toman un gran número de grabaciones para cada una de las notas.

Este efecto tiene como origen una peculiaridad de los macillos denominada rigidez no lineal. El martillo cambia de rigidez según el nivel dinámico, es decir, si el martillo golpea una cuerda a un nivel dinámico pequeño (menor velocidad), es sentido por la cuerda como un material suave, pero al aumentar la fuerza del martillo este material se transforma en uno mucho más rígido. Entonces,

una nota en forte (tocada con fuerza) genera un impulso inicial mucho más abrupto que una nota en piano (tocada con suavidad), por lo que la primera tendrá un componente espectral mucho mayor que la segunda [20].

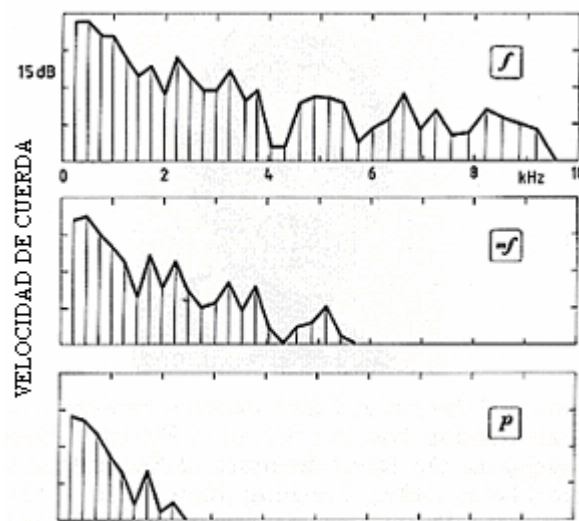


Figura 22. Diferencias en el espectro de los distintos niveles dinámicos [20].

3.6.4. Acoplamiento entre cuerdas

Otro de los efectos de segundo orden que influyen en el tono del piano es causado por la necesidad comentada anteriormente de usar más de una cuerda por nota para lograr un compromiso adecuado entre volumen y duración de tono.

En la siguiente figura se mostrará la función típica de decaimiento para un tono de piano. La cuerda es golpeada aproximadamente en $t=2$ y el apagador vuelve a entrar en contacto con la nota aproximadamente en $t=17$. Se observa que la curva se puede dividir en 2 regiones: la primera,

llamada tono transitorio, dura desde que se golpea la nota en $t=2$ hasta $t=6$ y se observa que el tono desciende más rápido que en la segunda región, llamada tono permanente.

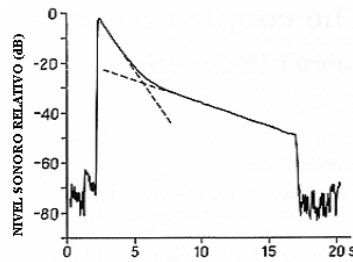


Figura 23. Nivel de Presión sonora frente al tiempo [20].

Este comportamiento puede explicarse debido a la existencia de dos modos de vibración. Un modo polarizado en la dirección en la que golpea el martillo y otro modo perpendicular al anterior. El primer modo nombrado es el modo principal, y al ser excitado con el martillo, comienza con una amplitud mucho mayor que el perpendicular, pero decae rápidamente. Sin embargo, dado que el puente no opone resistencia al segundo modo, el decaimiento de este es mucho más lento. Es por esto, que, tras una cantidad apreciable de vibración, el segundo modo se convierte en la componente dominante.

El mecanismo generador del segundo modo es el acoplamiento dinámico entre las 2 o 3 cuerdas golpeadas por el mismo martillo. Dos cuerdas atadas al mismo puente pueden vibrar en fase (modo simétrico), o en oposición de fase (modo antisimétrico). En el caso antisimétrico, las fuerzas ejercidas por el puente se cancelarían, transmitiendo poca energía a la tabla de resonancia, por lo que el decaimiento del tono sería lento. En el caso simétrico, la energía transmitida sería mucho mayor, así que el decaimiento del tono sería rápido.

Para simplificar la cuestión, pensemos en dos cuerdas atadas al mismo puente. Para estas cuerdas es posible vibrar en fase (modo simétrico), o en oposición de fase (modo antisimétrico)

En la figura puede apreciarse la diferencia entre el decaimiento del tono para una sola cuerda y para dos cuerdas acopladas. Se puede comprobar que en la segunda gráfica el tiempo de decaimiento es mucho mayor debido al nuevo modo de vibración que aparece, que es el denominado anteriormente como antisimétrico.

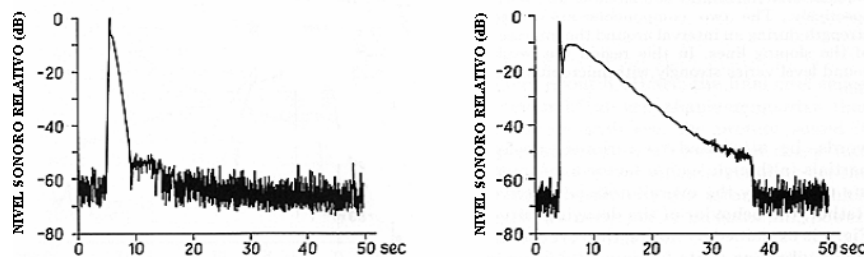


Figura 24. Diferencias entre el decaimiento para una cuerda y dos cuerdas conectadas al mismo puente [20].

A pesar de esto, el modo en el que el cerebro humano procesa los sonidos permite tomar ventaja de esta situación. Un sonido que comienza fuerte, aunque decaiga rápidamente al tono transitorio, a pesar de que es más débil, es percibido conjuntamente como fuerte y sostenido [20].

3.6.5. Inarmonicidad

Como ya se ha comentado anteriormente, los armónicos del piano no son exactamente múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. El espectro está algo más expandido y la diferencia entre parciales es mayor que la frecuencia fundamental. Típicamente, el décimo parcial toma la frecuencia del que sería el undécimo de se armónico. En primera instancia esta inarmonicidad podría considerarse un problema que habría que minimizar, pero

Los armónicos del sonido de piano no son exactamente múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. El espectro completo está algo más expandido y la diferencia entre parciales es mayor que la frecuencia fundamental. Típicamente, el décimo parcial toma la frecuencia del que sería el undécimo en un caso totalmente armónico. En principio, puede pensarse que esta inarmonicidad es un factor a minimizar. Sin embargo, contribuye a la formación del tono característico del piano y hace que el sonido suene menos artificial.

Este fenómeno se produce por la rigidez inherente de las cuerdas del piano, que produce una fuerza que se opone a la perturbación para restaurar el estado inicial, y esto lleva a la dispersión de ondas durante la propagación.

Considerando la ecuación de ondas de una cuerda rígida y sin pérdidas:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - K^2 \frac{\partial^4 y}{\partial^4} \quad c = \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad K = \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \quad I = \frac{\pi d_0^4}{64}$$

Donde y es el desplazamiento transversal, x la posición a lo largo de la cuerda, t el tiempo, c la velocidad de onda, K el coeficiente de rigidez, ρ la masa lineal y T la tensión. E es el módulo de Young de la cuerda e I su momento de inercia que depende del diámetro de la cuerda d_0 .

Resolviendo la ecuación de onda para rigidez despreciable ($K \ll 1$), se obtienen los siguientes modos [17]:

$$f_n = n f_0 \sqrt{1 + B n^2} \quad \text{para } n > 0 \quad f_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad B = \frac{EI \pi^2}{TL^2}$$

Donde f_0 es la frecuencia fundamental y B el **factor de inarmonicidad**.

Puede verse, por tanto, que el factor de inarmonicidad es proporcional al diámetro de la cuerda (a su cuarta potencia). A mayor diámetro, la cuerda tiene mayor rigidez, asemejándose cada vez más a una barra rígida. Esta es otra razón por la cual, las cuerdas del registro grave se fabrican en acero hilado en cobre, de forma helicoidal y no simplemente aumentando el grosor de la cuerda.

El factor de inarmonicidad es también inversamente proporcional a la longitud de la cuerda (al cuadrado). Por tanto, los pianos de cola al poseer cuerdas de mayor longitud presentan un menor factor de inarmonicidad que los pianos verticales.

Al oído, los sonidos de piano en el registro grave parecen más inarmónicos que en el agudo. Esto se debe a que las cuerdas graves al ser más largas contienen más parciales que las agudas, permitiendo una mayor percepción de la inarmonicidad. Otro motivo es que el umbral de audición está más cercano a la inarmonicidad del piano en el rango agudo [20].

3.6.6. Modos resonantes en la tabla armónica

Por último, se va a hablar de algunos de los modos que exhibe la tabla armónica. Al ser un elemento muy grande, las frecuencias resonantes entrarán en el rango de audición y por tanto se deben tener en cuenta a la hora de modelar el sonido del piano.

En la siguiente figura se pueden observar los 4 primeros modos resonantes para una tabla armónica típica de un piano de cola.

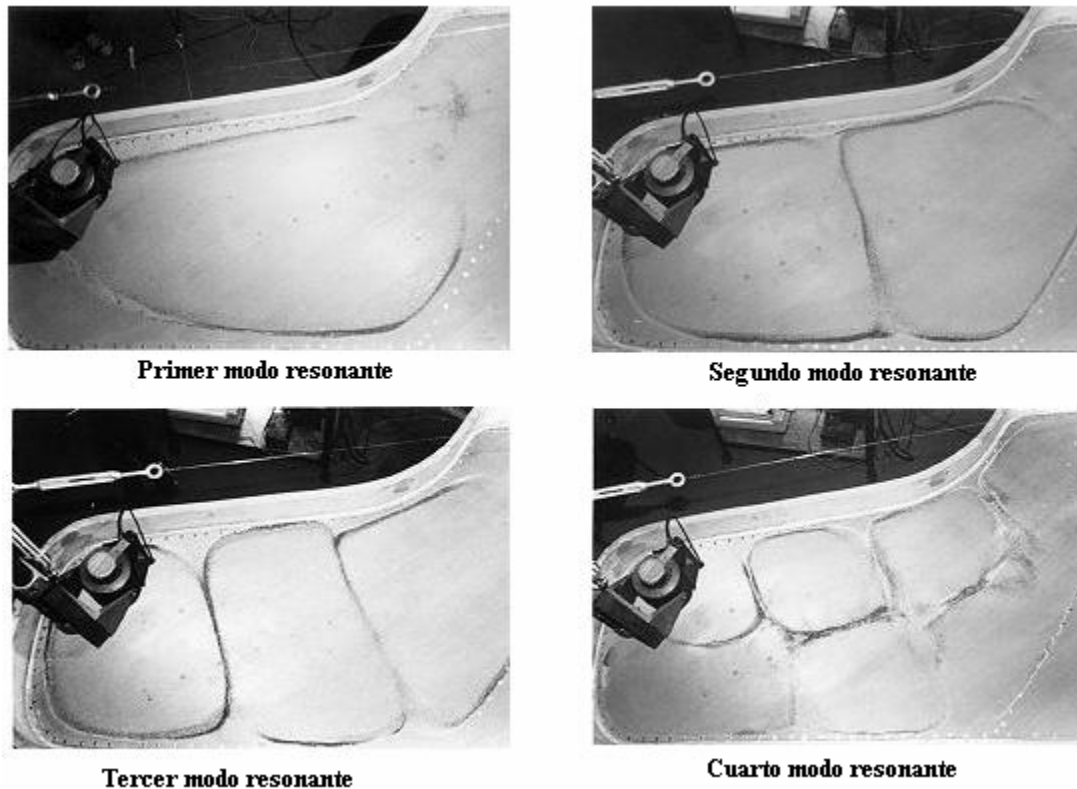


Figura 25. Modos resonantes en una tabla armónica [20].

Para poder visualizar el patrón de la onda se ha cubierto uniformemente la tabla con una mezcla de partículas finas y se ha conectado a un vibrador. El vibrador se ha ido sintonizando lentamente hasta alcanzar cada una de las frecuencias resonantes, momento en el que se observa un incremento del nivel sonoro emitido por la tabla armónica. En este momento las partículas se alejarán de los vientres para acumularse en los nodos.

La frecuencia del modo resonante más bajo suele estar en torno a los 50 Hz. En este modo, el centro de la tabla armónica vibra violentamente (vientre) mientras que los bordes permanecen estáticos (nodos). La tabla armónica pierde rápidamente su efectividad como elemento radiante y amplificador del sonido a frecuencias por debajo de las del primer modo resonante, así que los tonos por debajo de 50 Hz, es decir, los del registro más grave, no suelen tener mucha energía en su primer armónico [20].

4. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación se van a describir las distintas herramientas utilizadas para medir las diferentes piezas del piano, y posteriormente se describirá el software que se utilizará para el modelado de las piezas y su posterior ensamblaje.

4.1. Materiales de medición

El piano es un instrumento que posee una gran variedad de piezas muy variadas en tamaño y geometría, por lo que para su correcta medición se han necesitado diferentes tipos de instrumentos de medición, ya que para cada tipo de medida (longitud, diámetro, profundidad, radios de curvatura...) existe un instrumento adecuado. Para este proyecto se han necesitado 3 instrumentos de medida: El calibre, una cinta métrica y galgas.

4.1.1 Calibre

Va a resultar el instrumento de medición más utilizado en esta ocasión, gracias a su versatilidad y exactitud. Se ha utilizado para medir pequeñas longitudes de piezas pequeñas, diámetros exteriores e interiores y medidas de profundidad.

Un calibre, pie de rey o vernier es una herramienta de medición que ofrece un patrón con el cual se compara este patrón con lo que se quiera medir. Es utilizado mayormente para medir diámetros interiores y exteriores con una precisión mayor al de una regla común. También se puede utilizar para medir profundidades [18].

4.1.1.1. Funcionamiento

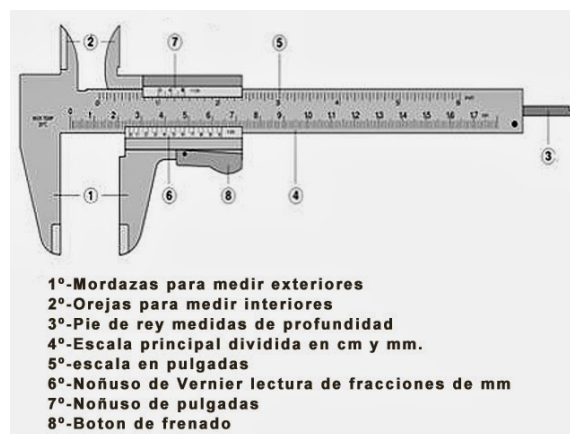


Figura 26. Calibre o pie de rey [21].

Para las longitudes o medidas exteriores se coloca la pieza entre las mordazas exteriores, y una vez haga contacto en ambas, se puede leer la distancia.

Para los diámetros interiores se utilizan las orejas para medir exteriores. Se introducen dentro del agujero que se quiera medir y se abren hasta que ambas orejas estén en contacto con el

agujero. En caso de ser un agujero circular, el diámetro será la distancia máxima que se pueda obtener dentro del mismo.

Para medir profundidades, se apoya el extremo inferior sobre una superficie de referencia a partir de la cual se van a tomar las medidas, y, al ir abriendo el calibre se puede observar cómo una esbelta pieza de metal comienza a sobresalir hasta estar en contacto con la superficie cuya distancia con respecto a la de referencia se quería medir.

En los 3 casos, a la hora de hacer la lectura se hace con la escala principal o con la escala en pulgadas, pero en este caso se utilizará la escala principal para todas las medidas ya que el piano está fabricado siguiendo las unidades del SI.

4.1.1.2. Tipos

Según la medición a realizar:

- **Calibres patrón:** calibres que sirven como referencia para fabricar otros calibres.
- **Calibres verificación:** Utilizados generalmente para la medición de piezas terminadas.
- **Calibres de trabajo:** Utilizados durante el trabajo.

Según su funcionamiento:

- **Calibre pie de rey universales:** Son los calibres tradicionales. Tienen una gran duración y un bajo costo al no utilizar mucho herramental.
- **Calibre pie de rey con reloj:** Son similares a los calibres solo que poseen un reloj que permiten la lectura inmediata del valor de la medición. Tiene como ventaja mayor claridad en las lecturas, pero posee la desventaja de que no tiene la posibilidad de medir en pulgadas.
- **Calibre pie de rey digitales:** Son los calibres mas modernos del mercado. Tienen la gran ventaja de que la medición es mostrada directamente por la pantalla y no lleva a errores por observación. Tiene la desventaja de que son los mas caros del mercado.

4.1.1.3. Modelo utilizado

Para este trabajo se ha escogido el pie de rey digital, ya que, a pesar de ser más caros, era el más cómodo debido a la gran cantidad de piezas a medir. Se trata de un calibre digital de la marca Tacklife que posee las siguientes características:

- Campo de medida: 150 mm
- Resolución: 0.01 mm
- Exactitud: ± 0.03 mm

4.1.2. Cinta métrica

También llamada flexómetro, o simplemente metro, consiste en una cinta flexible graduada que se puede enrollar facilitando así su desplazamiento. También con ellas se pueden medir superficies curvas, lo que resultará útil para este trabajo [22].

4.1.2.1. Tipos

- Metro de carpintero o plegable: Consiste en una cinta de uno o dos metros de largos con segmentos plegables de 20 cm. Antiguamente eran de madera o de metal, pero hoy día se hacen de nylon o fibra de vidrio.
- Cinta de costurero: Están fabricadas de un material muy flexible, generalmente plástico o tela, creadas para adaptarse a las prendas de vestir durante el proceso de confección.
- Flexómetro: es una cinta de acero templado enrollado dentro de la carcasa con seguro que permite la retención de la cinta o su regreso y permite medir longitudes. Los más comunes tienen un campo de medida de 3 o 5 metros.

Para este trabajo se ha escogido la cinta de costurero, debido a su flexibilidad y su capacidad para introducirse en el interior del piano, lo que permitiría tomar medidas sin necesidad de retirar demasiadas piezas.

Las características de la cinta escogida son las siguientes:

- Campo de medida: 2 m
- Resolución: 1 mm

4.1.3. Galgas de radio

Galga de radios, fabricada en acero inoxidable, que permite la medición (en milímetros) de radios cóncavos y convexos con un rango de medición de 1 a 7 mm y con una precisión de lectura de 0,5 mm [22].

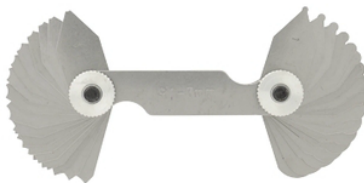


Figura 27. Galgas de radio [23].

Se han utilizado para medir distintas curvaturas de las diferentes piezas, desde la curvatura de las teclas cuya función es no dañar los dedos del pianista, hasta aquellas que se pueden encontrar en los distintos mecanismos.

4.1.4. Transportador de ángulos

Por último, se ha utilizado un transportador de ángulos. Es un instrumento que sirve para trazar y medir ángulos en grados. Tiene forma semicircular y tiene un campo de medida de 180°.

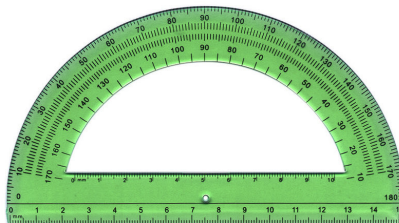


Figura 28. Transportador de ángulos [24].

Para medir un ángulo en grados, se alinea el lado inicial del ángulo con el radio derecho del transportador y se determina, en sentido contrario al de las agujas del reloj la medida del ángulo que se pretendía obtener.

4.2. Software utilizado

A continuación, se va a hacer una introducción acerca de qué consiste un programa de diseño asistido por computadora (CAD), sus posibilidades y se nombrarán los más importantes. Entre ellos se evaluará cuál es el mas adecuado para este trabajo y será el que se use para la modelación y ensamblaje de todas las piezas.

4.2.1. Introducción a Software CAD

El uso de herramientas de diseño por ordenador ofrece costes reducidos, más calidad en los productos desarrollados y un tiempo de elaboración menor. Estos tres elementos son clave para determinar una buena comercialización de los productos en un mercado cada vez más competitivo. Esto puede advertirse especialmente en el mercado automovilístico, en el que continuamente van surgiendo nuevos modelos y cada modelo dura menos tiempo; a mediados del siglo pasado, sin embargo, la cantidad de modelos era más reducida y duraban mucho más tiempo en el mercado.

Por estos motivos, las herramientas CAD/CAM (Computer Assisted Design) han aumentado su popularidad de manera exponencial en los últimos años, de tal manera que su uso está ya extendido a prácticamente todas las áreas industriales. A continuación, expondremos los campos de aplicación más relevantes relacionadas con las herramientas CAD/CAM para comprender la situación actual [25].

4.2.2. Campos de aplicación y funciones de las herramientas CAD/CAM

A continuación, expondremos los campos de aplicación más relevantes relacionadas con las herramientas CAD/CAM para comprender la situación actual.

4.2.2.1. Mecánica

Es el campo para el que más se ha utilizado este tipo de tecnología, motivado por las industrias automovilísticas y aerospacial. Las aplicaciones más habituales el CAD/CAM para la mecánica incluyen librerías de piezas mecánicas, modelado y simulación de moldes, fabricación rápida de prototipos, generación y simulación de programas de control numérico, etc. [26]

4.2.2.2. Arquitectura e Ingeniería Civil

Desde que existe, la tecnología CAD/CAM se ha utilizado en este campo, en sus inicios para delineaciones en 2D, y hoy día se incluyen también herramientas 3D. Las aplicaciones más habituales son las librerías de elementos de construcción normalizados, el diseño de interiores o de obras civiles o el cálculo de estructuras [26].

4.2.2.3. Sistemas de información geográfica y cartografía

Este campo incorpora cada vez más la tecnología CAD/CAM, debido a la posibilidad de conexión a Internet que aporta esta, y a que cada vez en más áreas se encuentran incorporando sistemas 3D a partir de sistemas 2D. Las aplicaciones más habituales relaiconadas con la cartografía y los sistemas de Información Geográfica (SIG) son el mantenimiento y producción de mapas y datos geográfico, el análisis topográfico, estudios medioambientales, catastros, etc. [26]

4.2.2.4. Ingeniería Eléctrica y electrónica

Las aplicaciones más habituales del CAD/CAM relacionadas con la Ingeniería eléctrica y electrónica son la creación de librerías de componentes normalizados, el diseño de circuitos integrados, el diseño de instalaciones eléctricas, etc. [26].

4.2.3. Algunos softwares de diseño asistido por ordenador

A continuación, vamos a presentar algunos softwares de diseño, agrupados por el público al que se dirigen.

En los programas gratuitos pensados para principiantes nos encontramos con TinkerCAD, FreeCAD y BlocksCAD.

TinkerCAD es un programa desarrollado por la empresa Autodesk. Está basado en la creación de bloques a partir de los cuales se pueden elaborar modelos. Es un programa sencillo, que sin embargo cuenta con limitaciones para algunos diseños. Cuenta con una biblioteca con multitud de archivos para que los usuarios encuentren el formulario que mejor se adapte a sus necesidades y puedan modificarlo. Es ideal para aquellos sin experiencia en modelado 3D.

FreeCAD es un programa de modelado 3D en parámetros y de código abierto. Esta herramienta permite crear diseños de objetos reales de diferentes tamaños. Es posible consultar el historial de tu modelo y y modificar su configuración para conseguir distintos resultados. No está pensado para profesionales, pero constituye un buen punto de partida para principiantes.

BlocksCAD es un software específicamente desarrollado para el aprendizaje, de manera que un usuario de BlocksCAD sea capaz de manejar OpenSCAD, más profesional. BlocksCAD cuenta con un canal de YouTube en el que comparte distintos tutoriales sobre modelado 3D. Además, el código de BlocksCAD es compatible con el de OpenSCAD, lo cual permite definir y perfeccionar los modelos. Los comandos para elaborar los diseños se representan en bloques de colores, como los bloques de construcción LEGO. OpenSCAD o STL son los formatos de exportación.

Entre las herramientas pensadas para usuarios intermedios nos encontramos con Creo y Fusión 360.

Creo es uno de los programas CAD de diseño de productos que lideran el mercado. Fue desarrollado por Parametric Technology Corporation hace 30 años. Cuenta con diversas herramientas tales como generación de superficies paramétricas, análisis térmico, estructura, movimiento y estilo libre o modelado directo. Es un software muy completo, que permite elaborar los cálculos al mismo tiempo que diseñas tu idea final. Creo 5.0, su versión más reciente, fue lanzado en 2018 y cuenta con una interfaz mejorada. Su versión de prueba gratuita puede usarse durante 30 días.

Fusión 360° es un software CAD online: agrupa los equipos de diseño a través de la nube para participar en proyectos más intrincados. Es una herramienta que permite almacenar el historial de un modelo, además de incluir modelado de formas libres, sólidos y estructuras de celosía. Fusión 360° está disponible en una suscripción mensual.

Por último, no encontramos con los softwares profesionales como Solidworks, AutoCAD, CATIA, OpenSCAD y Rhino 3D.

Solidworks ha sido desarrollado por la empresa Dassault Systèmes, y es uno de los más populares del mercado. Permite generar tres tipos de archivos al usar diseño paramétrico: pieza, ensamblaje y dibujo. Este programa incluye varias herramientas, tales como las de validación de diseño o ingeniería inversa.

Es específico y funcional, que se utiliza para piezas industriales. Solidworks usa un sistema NURBS que presenta curvaturas detalladas, lo que contrasta con otros programas CAD que usan estructuras planas inclinadas.

AutoCAD fue lanzado en 1982 por la compañía Autodesk. Actualmente no es el más fácil de manejar para el modelado 3D, a pesar de que es ampliamente usado. Está pensado para usuarios profesionales experimentados en la programación de modelos algorítmicos, con una cierta dificultad a la hora de aprender a dominar macros y scripts. Es posible convertir los modelos 3D en archivos STL para imprimir en 3D. En 2010 lanzaron una aplicación móvil para AutoCAD y una página web, AutoCAD 360°.

CATIA es un programa muy conocido en el sector aeroespacial, ya que fue desarrollado para suplir las necesidades de Dassault Aviation. Se usa especialmente en ingeniería mecánica y eléctrica, así como en el diseño y la ingeniería de sistemas. Este software permite a los usuarios optimizar las tareas y organizarse de forma más eficaz debido a las herramientas de simulación y modelado 3D que ofrece.

OpenSCAD es un programa de código abierto gratuito. Está pensado para diseñar modelos sólidos en 3D, y es usado sobretodo por usuarios con experiencia que estén buscando una plataforma para proyectos más complejos. Es muy intuitivo para los programadores, gracias a la geometría con la que cuenta de construcción sólida y a la extrusión de contorno 2D. Es idóneo para las formas simples que ya estén concretadas en parámetros. Este programa puede ser complicado para aquellos usuarios sin un manejo fluido en el lenguaje de descripción.

Rhinoceros 3D está creado por Robert McNeel & Associates, originalmente parte de AutoCAD. Se presenta como el programa más versátil en modelado 3D. Usa el modelo NURB para manipular mallas, curvas, superficies, puntos y sólidos, entre otros. Ofrece una vasta colección de características de diseño, así como mucha versatilidad para crear modelos complejos en 3D. Aun así, según algunos usuarios el software necesita de mucho tiempo y práctica para dominarlo. Actualmente Rhinoceros 3D se puede descargar en su sitio web en diferentes paquetes [26].

4.2.4 Software elegido: CATIA

De todos los programas presentados anteriormente, finalmente se ha decidido utilizar CATIA, debido a que es un programa muy utilizado en muchos sectores de la ingeniería y además permite crear cualquier tipo de ensamblajes 3D para casi la totalidad de los procesos de ingeniería mecánica. Esto resulta ideal para esta ocasión, ya que una buena herramienta para el ensamblaje es fundamental debido a la gran cantidad de piezas a colocar.

CATIA (Computer-aided Three Dimensional Interactive Application) es un software informático de diseño, fabricación e ingeniería asistida por computadora desarrollado por Dassault Systèmes. El programa está desarrollado para proporcionar apoyo desde la concepción del diseño hasta la producción y el análisis de productos.

Inicialmente fue desarrollado para la industria aeronáutica, haciendo hincapié en el manejo de superficies complejas, y hoy en día es muy usado en la industria del automóvil sobre todo para el diseño y desarrollo de componentes de carrocería. Así, empresas como el Grupo VW (Volkswagen, Audi, SEAT y Skoda), BMW, Renault, Peugeot, Chrysler y Porsche hacen un amplio uso del programa.

CATIA pretende suministrar una gran cantidad de herramientas al usuario, y para ello dispone de un entorno modular, en el que se encuentran más de 100 módulos que permiten la personalización del producto según el sector que se pretende desarrollar.

Para este trabajo se va a utilizar el entorno que proporciona CATIA de diseño mecánico, que proporciona todas las herramientas para la creación y edición de piezas, el análisis sistemático de cuestiones del diseño como ángulos de salida y desmoldeos, análisis de curvaturas, propiedades físicas, etc. También está directamente relacionado con el desarrollo de ensamblajes, ya que la mayoría de las piezas han de ser incluidas en un producto final. Finalmente incluye un módulo de dibujo destinado a la extracción de los planos para la planta de fabricación. [27]

Las soluciones de CATIA cumplen con los requisitos de una gran variedad de sectores y cubren piezas de todo tipo, desde piezas forjadas o de fundición hasta la fabricación de piezas de materiales compuestos.

CATIA ofrece grandes ventajas con respecto a otros programas de modelado 3D, como pueden ser:

- Creación de todo tipo de piezas en 3D, desde croquis en 3D básicos hasta ensamblajes industriales completamente detallados.
- Posee un diseño racional que vincula los vínculos entre los objetos y los comportamientos relacionados en ensamblajes.
- Permite evolucionar fluidamente del diseño en 2D a 3D
- La actualización de sus dibujos es productiva y hace que no sean necesarias operaciones de más por parte del usuario.
- Posee herramientas que predicen la intención del proceso en las primeras etapas de diseño.
- Cuenta con una amplia gama de aplicaciones para el diseño de herramientas.
- Potentes herramientas para la confección de superficies a través del modelado basado en especificaciones [28].

A continuación, se va a hacer una breve introducción de varias de las funcionalidades de ingeniería que ofrece Catia:

- **Definición basada en el modelo:** permite usar una única fuente con toda la información del producto en 3D para definir el modelo.
- **Ingeniería mecánica:** Esta disciplina está diseñada para ofrecer soluciones altamente productivas y flexibles para reducir los ciclos que van desde el diseño a la fabricación.
- **Ingeniería de materiales compuestos:** Contiene una única plataforma donde se cubren todos los procesos de ingeniería y fabricación de los materiales compuestos.
- **Ingeniería de diseño de chapas metálicas:** Ofrece un módulo de diseño de chapas rápido y eficiente para acelerar el diseño de ensamblajes.
- **Ingeniería de diseño de cierres:** permite diseñar cierres simples y complejos de forma sencilla. Además, al mismo tiempo analiza el impacto del diseño mediante navegación por cierres y piezas de cierres.
- **Ingeniería de diseño de moldes y piezas de plástico:** presenta una solución integrada desde el diseño de piezas hasta la fabricación de herramientas.
- **Sistemas eléctricos:** permite diseñar los sistemas eléctricos de los diferentes productos, desde aviones o coches hasta electrodomésticos o plantas de procesado.

- **Sistemas de fluidos:** Sirve para el diseño de tubos, tuberías y sistema de HVAC para aplicaciones de todo tipo.
- **Ingeniería AEC:** Consiste en una solución para modelar, simular y visualizar programas de construcción. Está orientado a la arquitectura, la energía y la construcción.
- **Ingeniería de diseño de máquinas y equipos:** Ofrece una solución completa para el diseño, el modelado y la supervisión de la definición de productos de maquinaria industrial.
- **Ingeniería de transporte y movilidad:** Permite la gestión total del diseño, conformación y gestión de la integración del chasis y el mecanismo de transmisión de productos de la industria automovilística.
- **Ingeniería de alta tecnología:** Ofrece una solución completa para el diseño de productos de alta tecnología [29].

Por último, se hablará de los principales módulos que se han utilizado para la realización del proyecto:

4.2.4.1. Part design

Este módulo fundamental tiene como misión la creación y edición de sólidos en 3D. Permite la generación de todo tipo de piezas y/o componentes de cierto grado de complejidad a partir de herramientas específicas para cada concepto de creación.

CATIA ofrece una potente herramienta de diseño y edición de sólidos en 3D. El núcleo de diseño inteligente combina herramientas de alta productividad con metodologías booleanas. De esta manera es posible ofrecer enfoques que permitan soluciones flexibles de múltiples diseños a partir de herramientas específicas para cada concepto de creación. [34]

Aspectos destacados:

- Ofrece un modelador híbrido parametrizable compatible con CATIA V4
- Incorpora herramientas de definición de roscas en agujeros y superficies circulares.
- Incluye parametrización flexible y disponible post-diseño.
- Crea bocetos y diseños 3D en el contexto de montaje.
- Permite crear diseños más fáciles de comprender a través de la iniciativa con el editor de estructura de partes, agilizando el desarrollo del diseño inicial y sus posteriores cambios.
- Productos/herramientas de diseño de formas híbridos de mayor capacidad [30].

4.2.4.2 Assembly Design

En este apartado se encuentran todos los comandos necesarios para el correcto ensamblaje de las distintas partes que constituyen un conjunto y que permitirán la correcta simulación cinemática y dinámica de mecanismos en el mismo y de forma más específica en el módulo DMU Kinematics.

CATIA establece restricciones en el ensamblaje mecánico usando los movimientos del ratón o comandos gráficos para colocar fácilmente las piezas en su sitio. El diseño de montajes ayuda a los diseñadores que manejen montajes complejos que alberguen otros montajes usando un enfoque ascendente o descendente. Las piezas y los sub-montajes se pueden reutilizar fácilmente en el ensamblaje, sin problemas de duplicación de datos.

También ofrece herramientas de productividad tales como la comprobación de vista automática explotada, de colisión y de despeje. La creación de listas de materiales automáticas reduce drásticamente el tiempo de elaboración y aumentan la calidad. Los submontajes flexibles ofrecen al usuario la capacidad de separar la estructura del producto del comportamiento mecánico. Este comando único permite mover componentes individuales en el montaje *parent* y organizar diferentes posiciones internas del subcomponente instanciado.

La introducción de una plataforma de usuario intuitiva ofrece productividad, facilidad en su uso y costes de entrenamiento reducidos.

Aspectos destacados:

- Rango completo de herramientas de ensamblaje compatible con los equipos de diseño actuales.
- Ofrece anotación y documentación de montaje para todos los tipos de aplicaciones
- Herramientas de manipulación y modificación de ensamblajes eficientes, las cuales permiten análisis dinámicos de montaje y comprobaciones de colisión.
- Los ensamblajes son capaces de representar aplicaciones reales al usar tanto definiciones de montajes mecánicos como ensamblajes basada en listas de materiales rígidas.
- Producción/ingeniería simultánea entre el diseño de montaje y el diseño de las partes individuales [31].

5. DESARROLLO DEL TRABAJO

5.1. Medición, modelado y ensamblaje de las piezas.

A continuación, se expone el procedimiento de medición, modelado y ensamblaje de las distintas piezas que conforman el piano, así como su modelado en 3D mediante CATIA V5.

El desarrollo se estructura en cuatro conjuntos principales:

- El teclado y su mecanismo
- Los pedales y su mecanismo
- El bastidor
- Exterior

Por cada bloque se ha procedido de la siguiente forma:

1. En primer lugar, se han medido cada una de las piezas a modelar trasladando estas mediciones a planimetría.
2. A continuación, a través del soporte informático CATIA V5 se ha modelado en 3D cada una de las piezas que componen el conjunto.
3. Posteriormente se han ensamblado todas las piezas de cada bloque a través del módulo Assembly Design de CATIA.
4. Por último, se han ensamblado los distintos bloques formando el conjunto final con todas las piezas modeladas que componen el piano mostrando así el resultado final.

Dado que el objeto final es el modelado y ensamblaje de las piezas en 3D, para no ser exhaustivos únicamente reflejaremos las mediciones de algunas piezas representativas, a modo de ejemplos. Sin embargo, el ensamblaje se realizará con todo el conjunto de piezas modeladas.

5.2. El teclado y su mecanismo

5.2.1. El teclado y mecanismo individual

En primer lugar, se empieza realizando las mediciones de las distintas piezas que componen el mecanismo de cada tecla.

Como ejemplo se refleja la medición de una tecla, un macillo y un apagador*

*Todas las medidas están en mm y los radios de curvatura son 0,5 mm

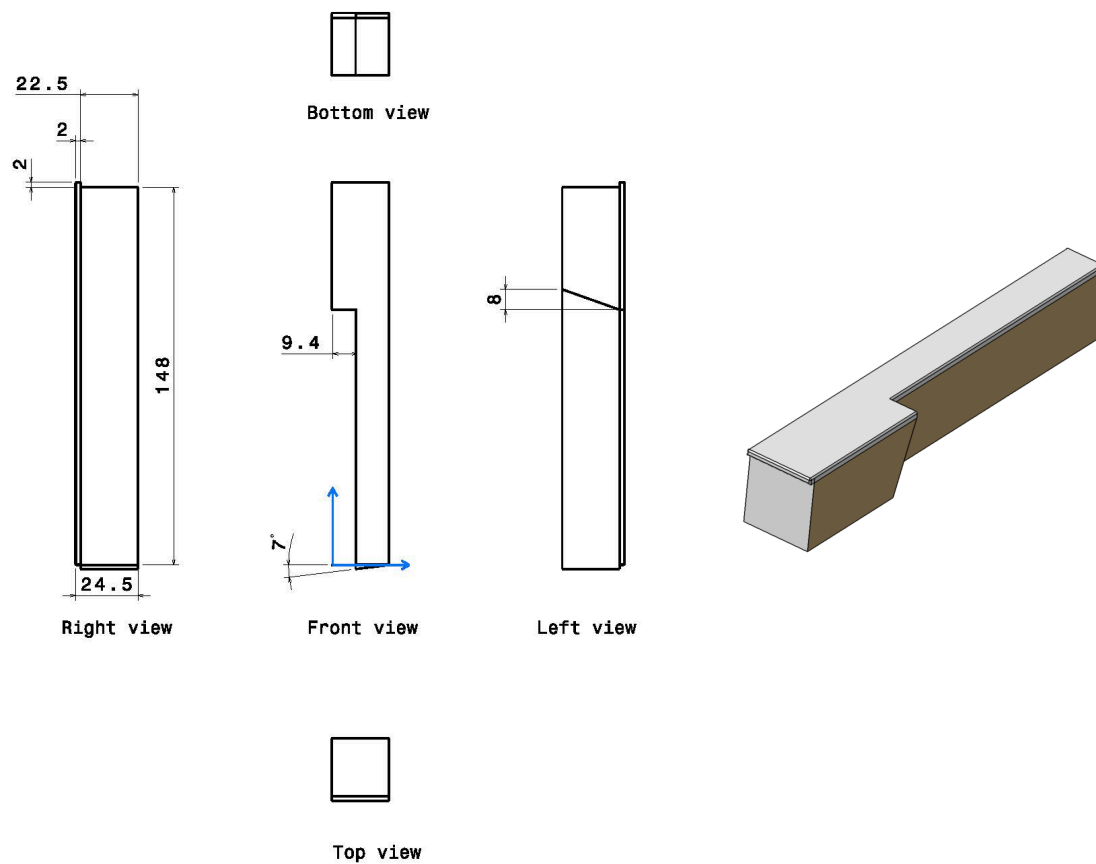
TECLA

Figura 29. Plano y medidas de tecla (Do¹). Fuente: elaboración propia.

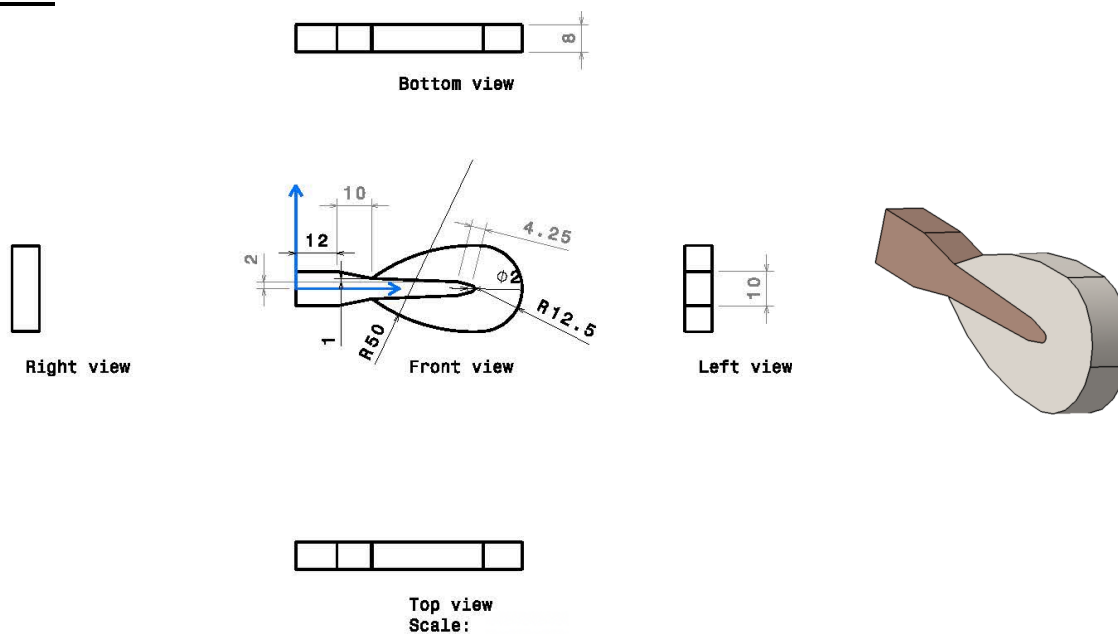
MACILLO

Figura 30. Plano y medidas del macillo. Fuente: elaboración propia.

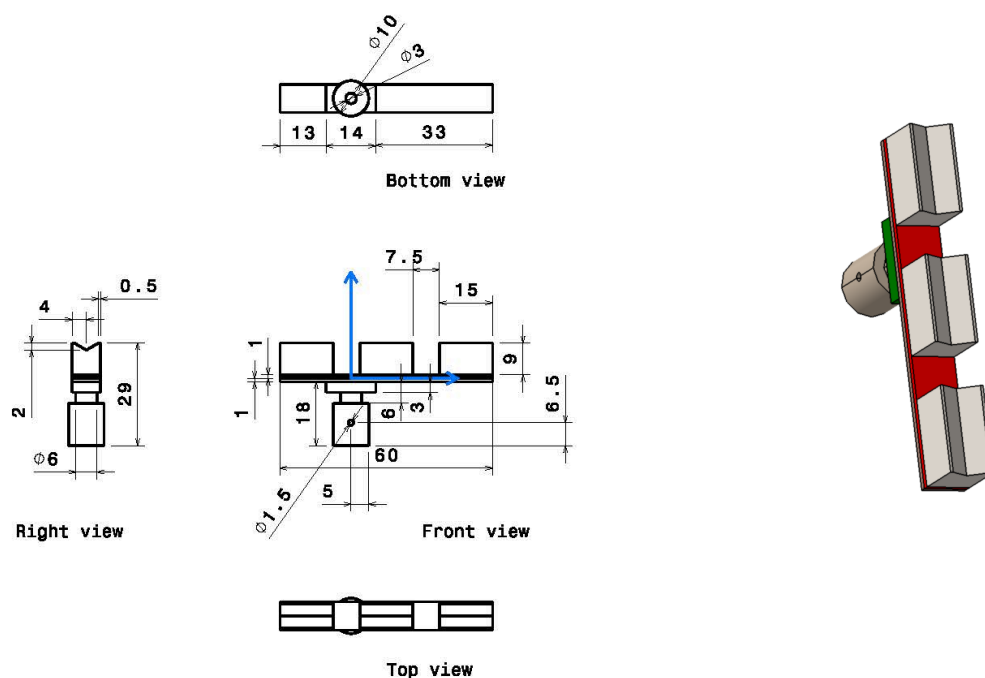
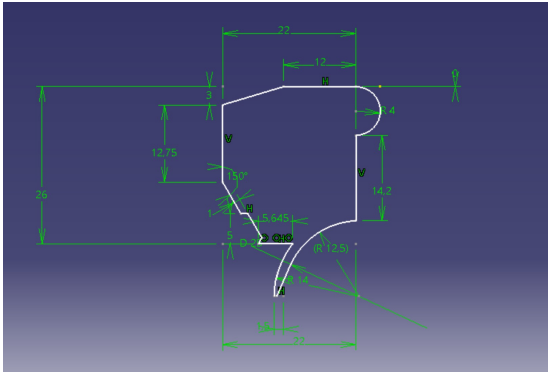
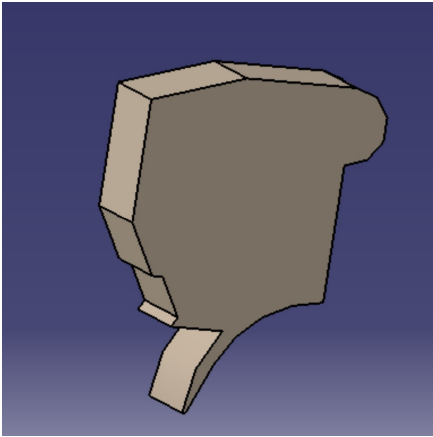
APAGADOR

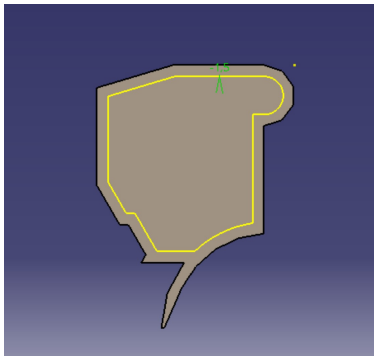
Figura 31. Plano y medidas de apagador. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se va a presentar paso a paso cómo se han ido modelando dos de las piezas del modelo que muestran una buena parte de las herramientas del programa CATIA V5 que se han estado utilizando durante todo el trabajo.

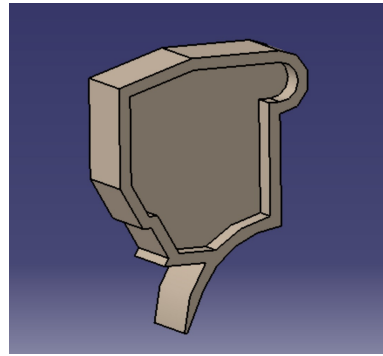
Estas piezas son la nuez del macillo y el atril o porta partituras.

Tabla 1. Modelado de la nuez paso a paso. Fuente: elaboración propia.

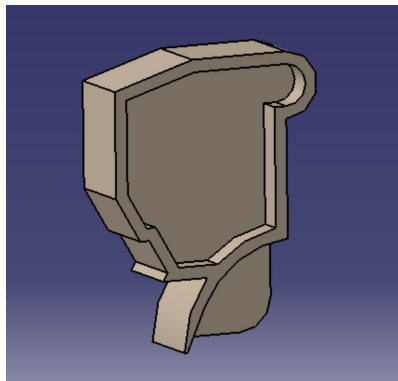
 <p>En primer lugar, se realiza un boceto inicial en el que se insertan las medidas tomadas anteriormente usando la herramienta Sketch.</p>	 <p>A continuación, se extruye el boceto con la herramienta Pad.</p>
--	--



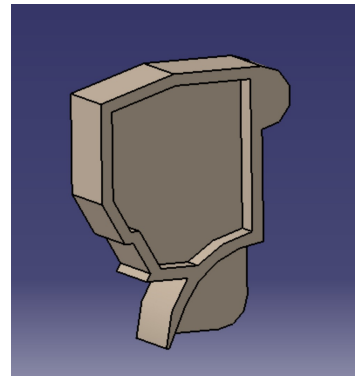
Con la herramienta Offset se obtiene el contorno desfasado.



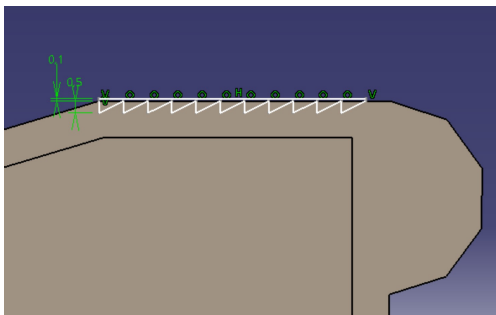
Una vez obtenido el nuevo sketch, se utiliza la herramienta Pocket. Posteriormente, se usa la herramienta Mirror para repetir la acción en la otra cara.



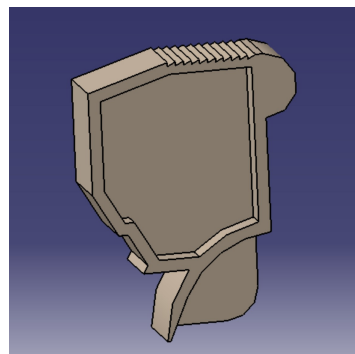
Con la herramienta Pad se añade la parte sobre la que gira la pieza.



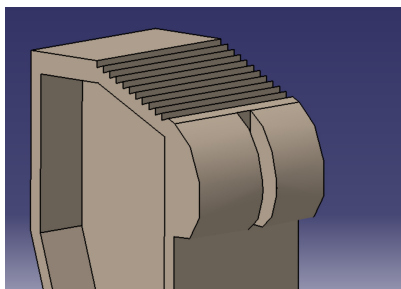
Se usa de nuevo la herramienta Pad para tapar el pequeño hueco que quedó con el Offset.



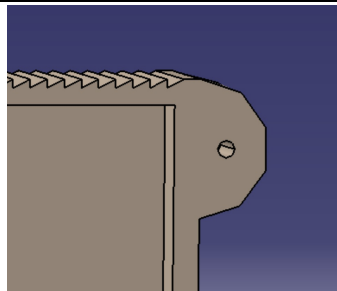
Utilizando la herramienta Patrón se le da rugosidad a ese extremo.



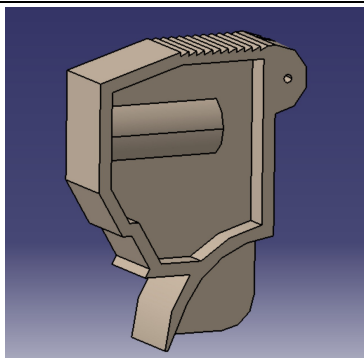
Se usa la herramienta Pocket para vaciar el material sobrante.



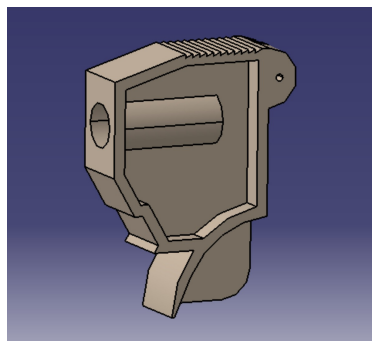
Con la herramienta Pocket se abre esa pequeña abertura.



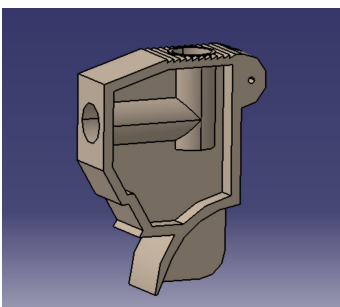
Y de nuevo se usa Pocket, en este caso para abrir un pequeño agujero.



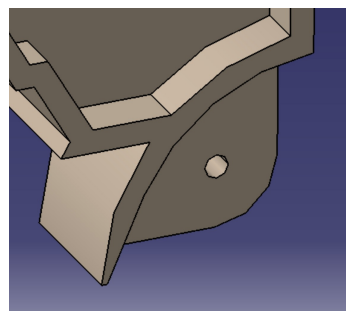
Con la herramienta Pad se crea un cilindro.



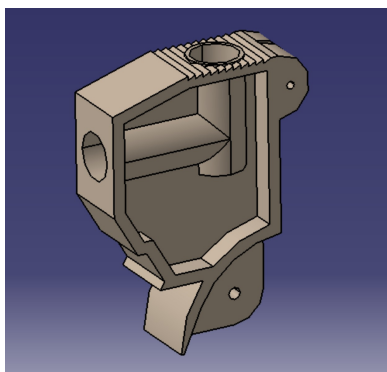
A continuación, se agujerea con Pocket para abrir la cavidad donde se situará el contra atrepe.



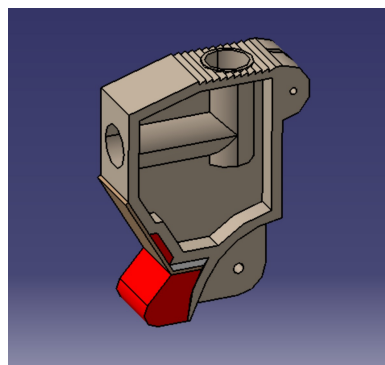
Se repite el proceso para abrir la cavidad donde se colocará el macillo.



El agujero que servirá de eje de giro de la nuez se crea con Pocket.

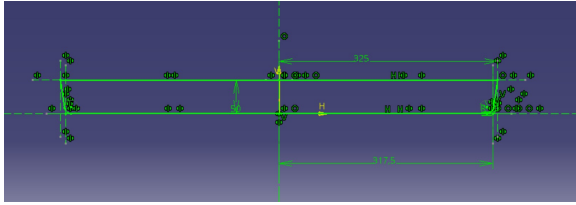


Aquí tenemos el resultado final antes de colocar los elementos de fieltro.

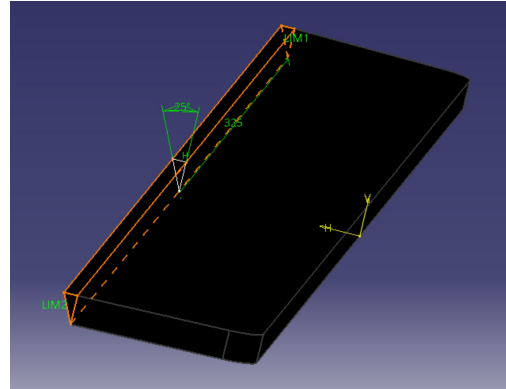


Por último, se crean varios bodies. Para cada uno se usa la herramienta Project 3D Elements y se terminan de dibujar los perfiles. Se extruyen los distintos bodies y finalmente se asigna a cada uno su color.

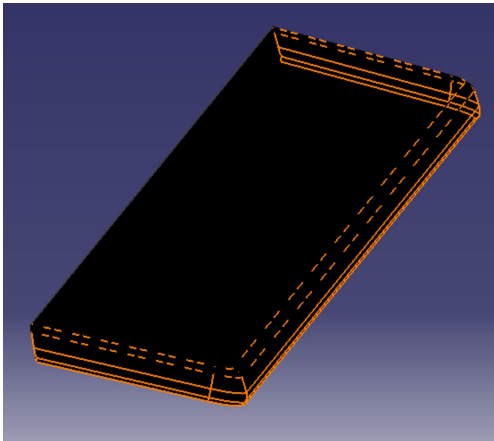
Tabla 2. Modelado del atril paso a paso. Fuente: elaboración propia.



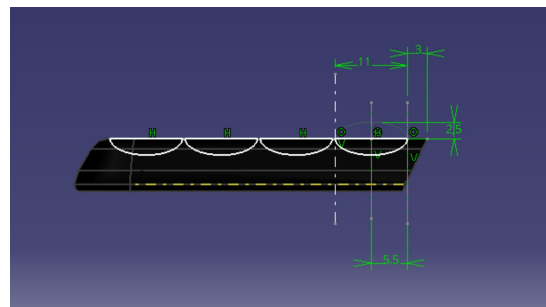
Se define el boceto inicial usando Sketch. Posteriormente se usa Pad para estruirlo.



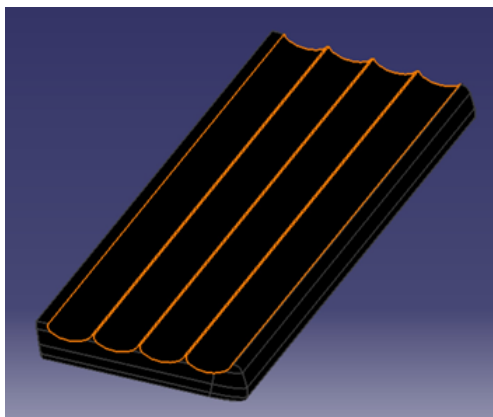
Se vuelve a usar Pad para añadir la superficie sobre la que va a estar apoyado el atril.



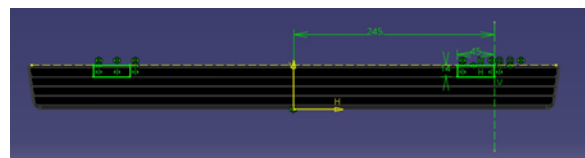
A continuación, se redondean los bordes para darle su forma con la herramienta Edge Fillet.



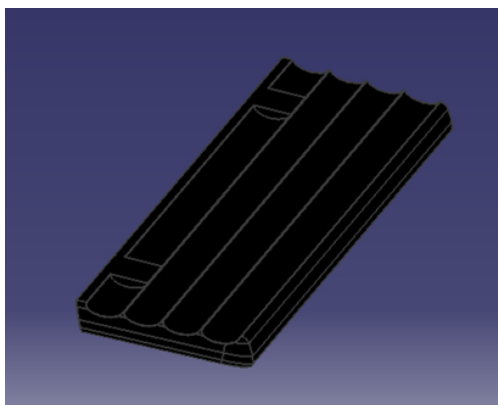
Usamos Translate para hacer los bocetos de las hendiduras del atril.



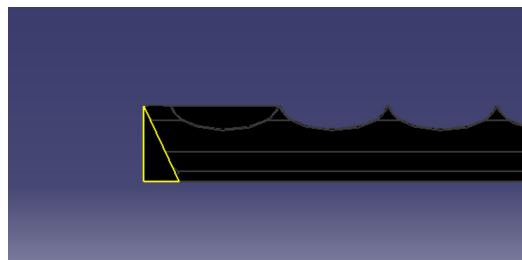
Con la herramienta Pocket se crean las distintas hendiduras.



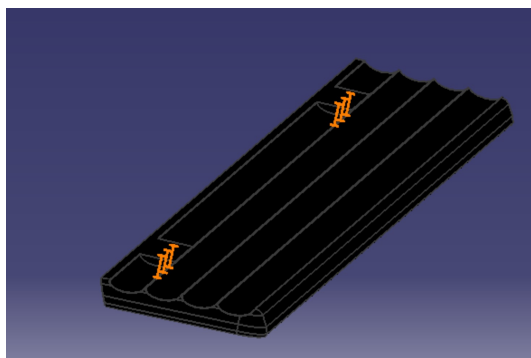
Se dibuja el boceto para crear la superficie donde irán colocadas las bisagras.



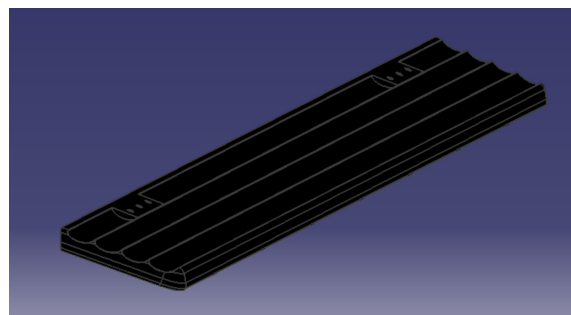
Con la herramienta Pad se estruye el boceto.



Se elimina el material sobrante con Pocket.

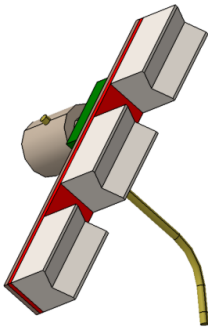
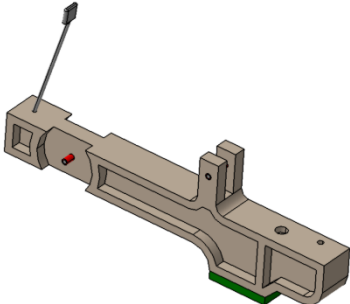



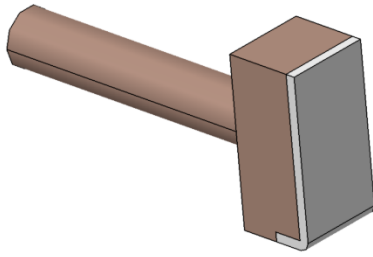
Finalmente, con la herramienta Pocket se crea el espacio en el que se colocarán los tornillos.



Aquí vemos el resultado final.

Tabla 3. Piezas que conforman el mecanismo individual de cada tecla. Fuente: elaboración propia.

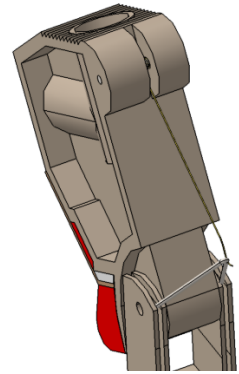
 <p>Apagador</p>	 <p>Báscula</p>	 <p>Atrape</p>
---	---	---



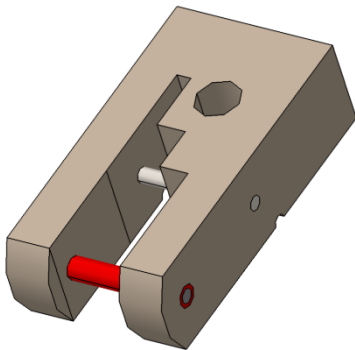
Contra atrape



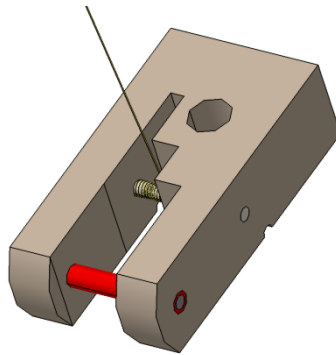
Cordoncillo y muelle



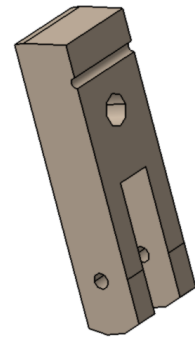
Detalle muelle



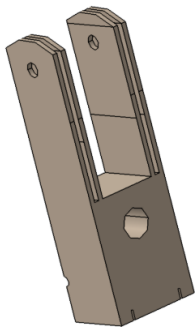
Horquilla apagador



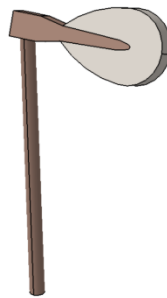
Horquilla apagador con el muelle



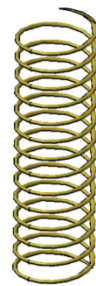
Horquilla báscula



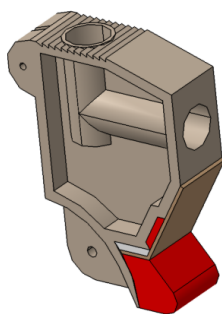
Horquilla nuez



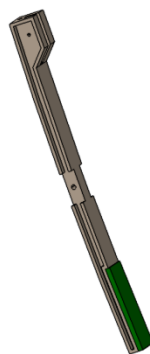
Mango y macillo



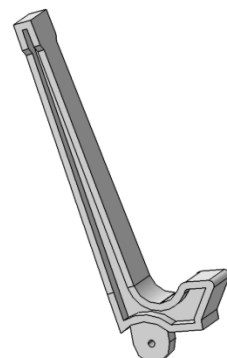
Muelle



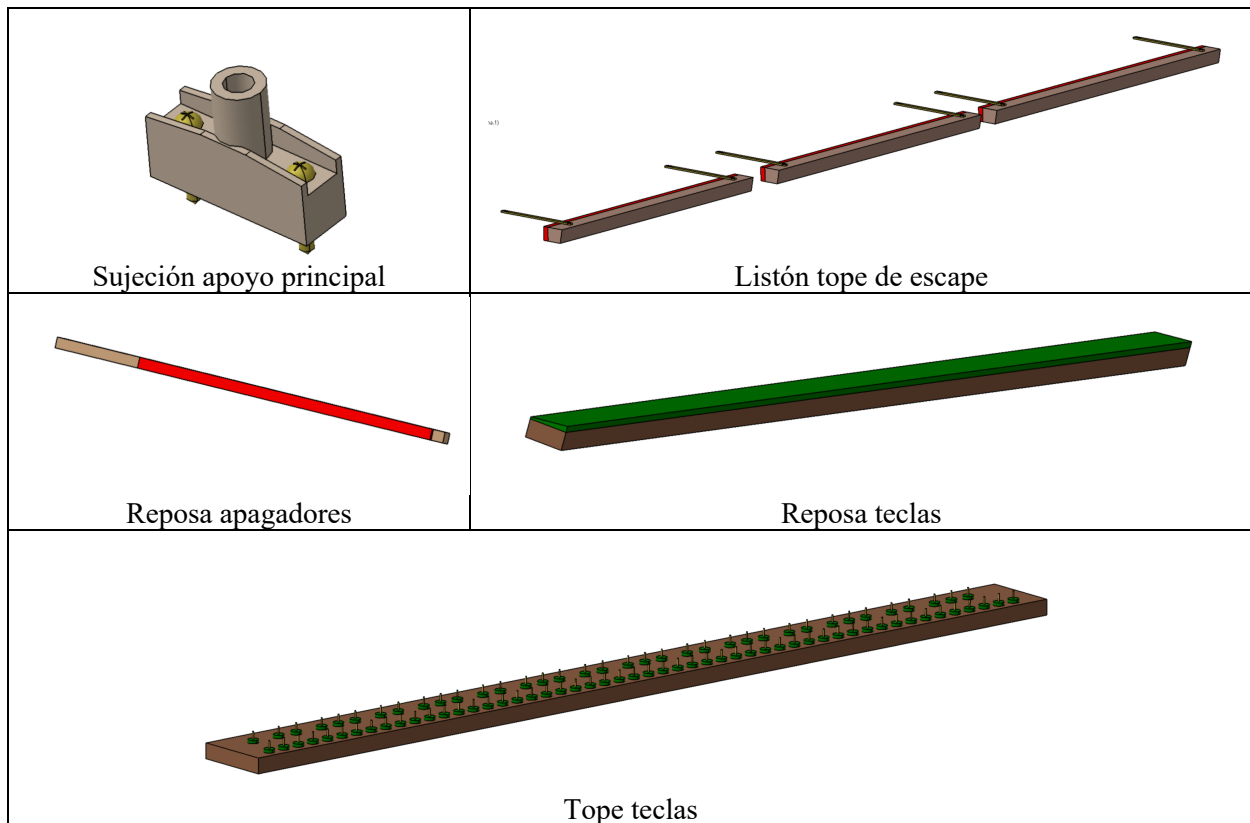
Nuez macillo



Palanca apagador



Palanca de escape



El mecanismo conjunto sería:

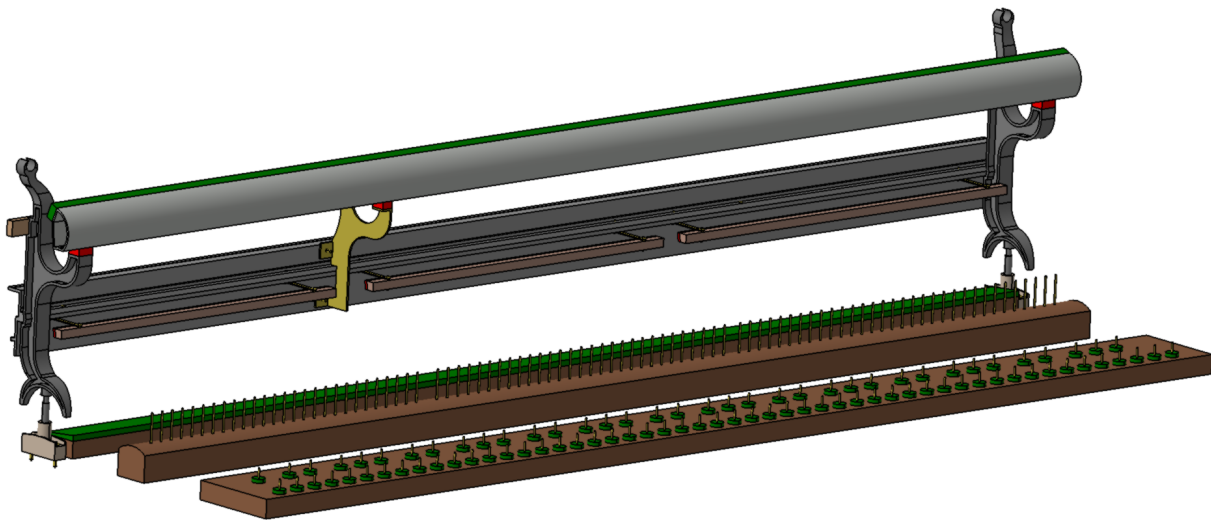


Figura 37. Mecanismo de teclas conjunto. Fuente: elaboración propia.

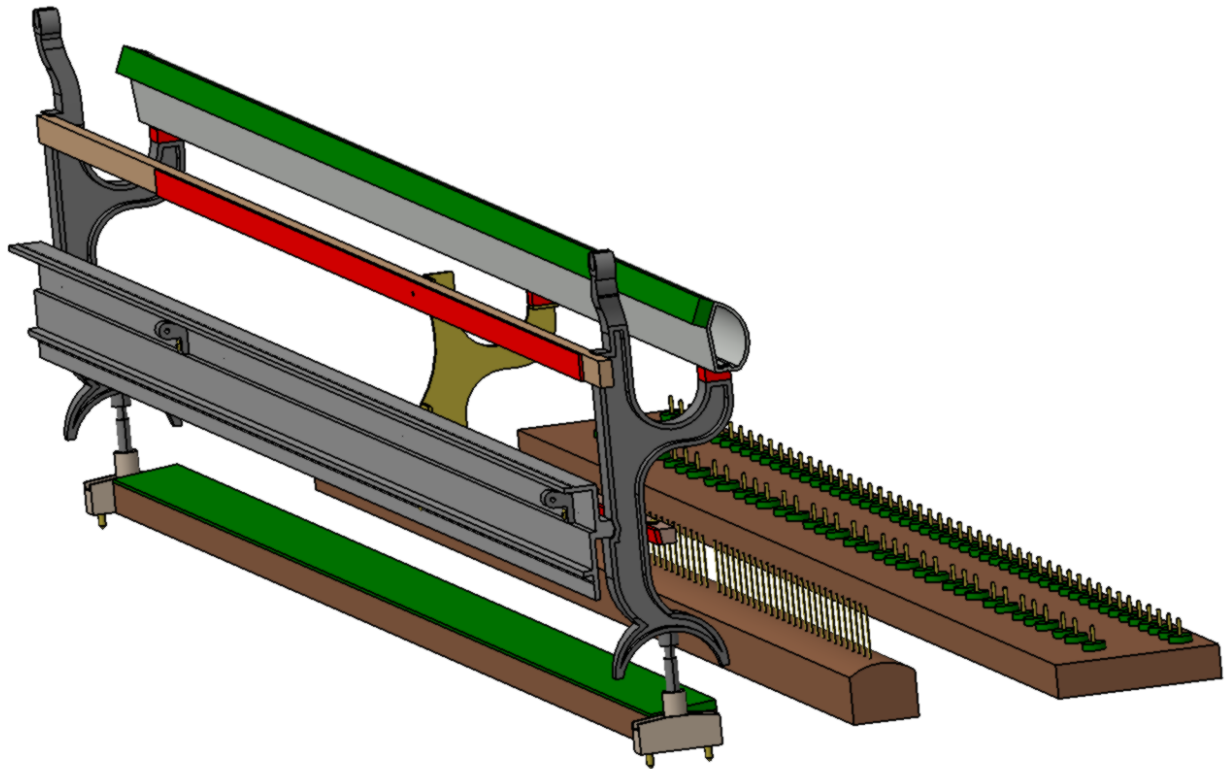


Figura 38. Mecanismo de teclas conjunto (vista trasera). Fuente: elaboración propia.

Al ensamblarse el mecanismo de cada tecla con el mecanismo conjunto quedaría de la siguiente forma:

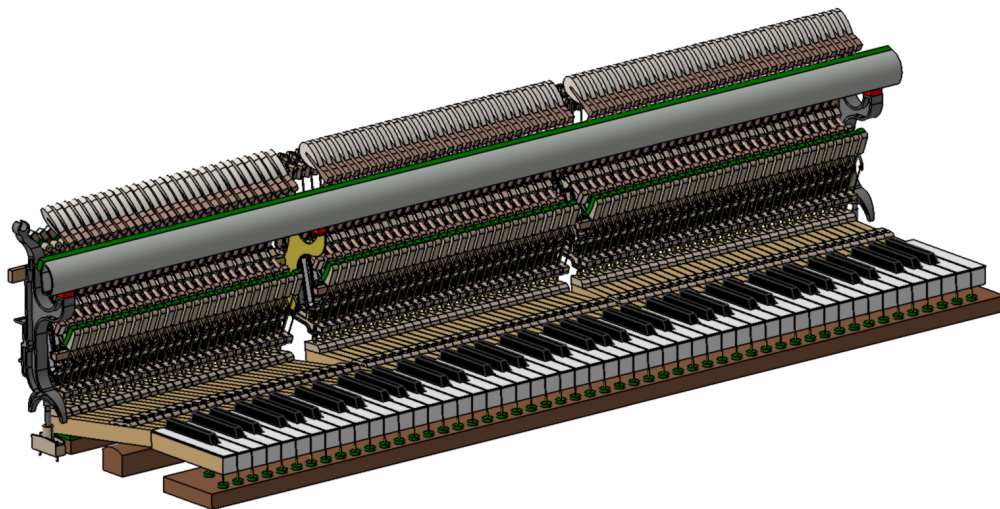


Figura 39. Ensamblaje del mecanismo de las teclas completo. Fuente: elaboración propia.

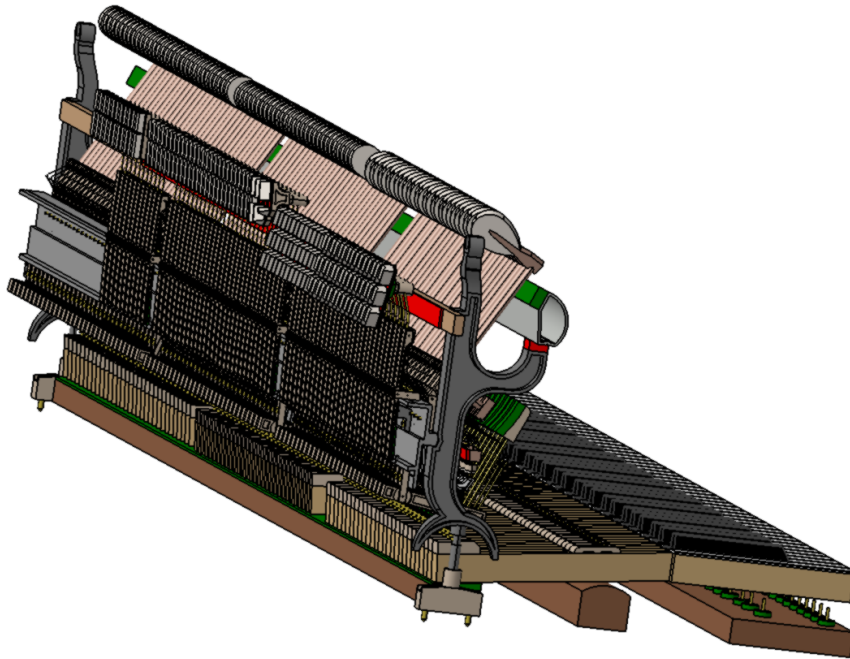


Figura 40. Ensamblaje del mecanismo de las teclas completo (vista trasera). Fuente: elaboración propia.

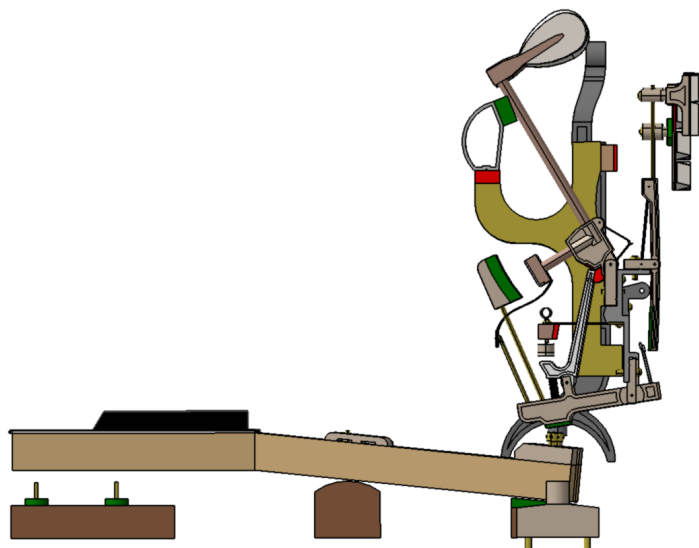


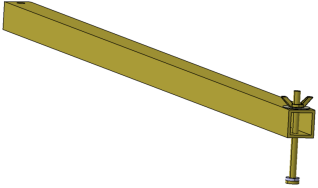

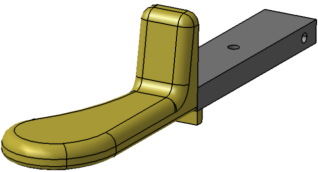
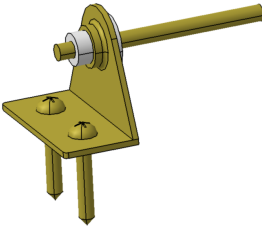
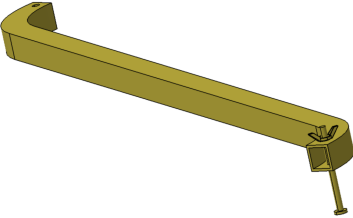
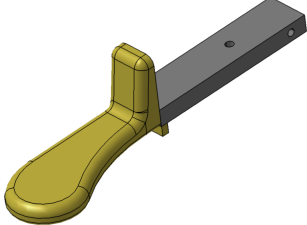

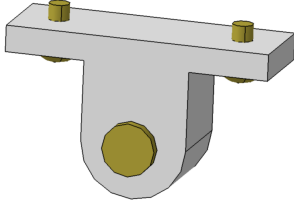
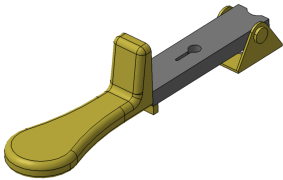
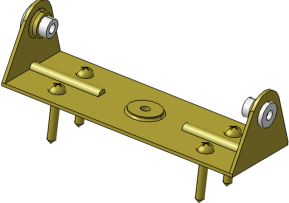
Figura 41. Ensamblaje del mecanismo de las teclas completo (perfil). Fuente: elaboración propia.

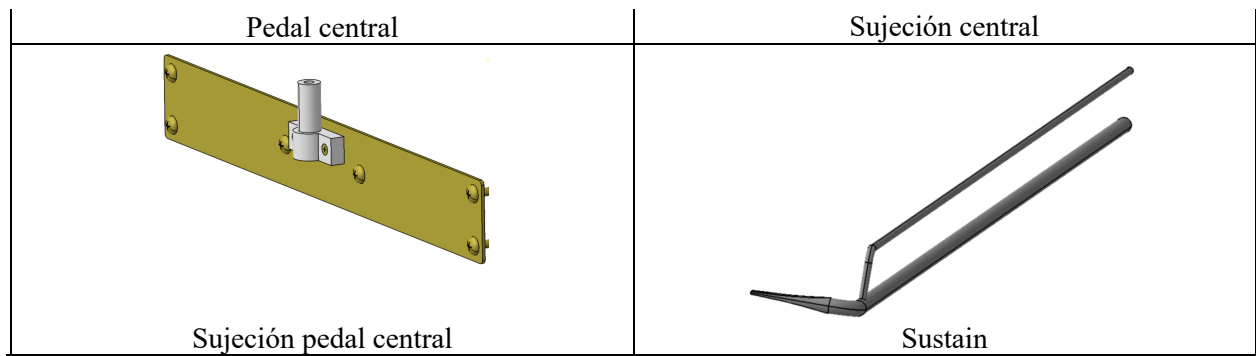
5.3. Los pedales y su mecanismo

Como ya se indicó son tres los pedales que componen un piano de cola, sin embargo, en el caso del piano vertical suelen ser dos. Cuando aparece un tercero la función es completamente distinta a la del piano de cola quedando relegada a la simple activación de la sordina, que hace que el sonido sea menos intenso en los ensayos o al tocar en casa.

Por ello pese a que el modelo de piano elegido dispone de tres pedales solo procedemos a la modelación del mecanismo de dos pedales, siendo la modelación del tercer pedal solo por estética.

Tabla 5. Piezas de los mecanismos de los pedales. Fuente: elaboración propia.

 <p>Palanca pedal izquierdo</p>	 <p>Muelle pedal</p>
 <p>Pedal izquierdo</p>	 <p>Sujeción lateral y eje pedal</p>
 <p>Palanca pedal derecho</p>	 <p>Pedal derecho</p>
 <p>Barra pedal derecho</p>	 <p>Eje giro palanca</p>
	



El mecanismo conjunto de los pedales es el siguiente:

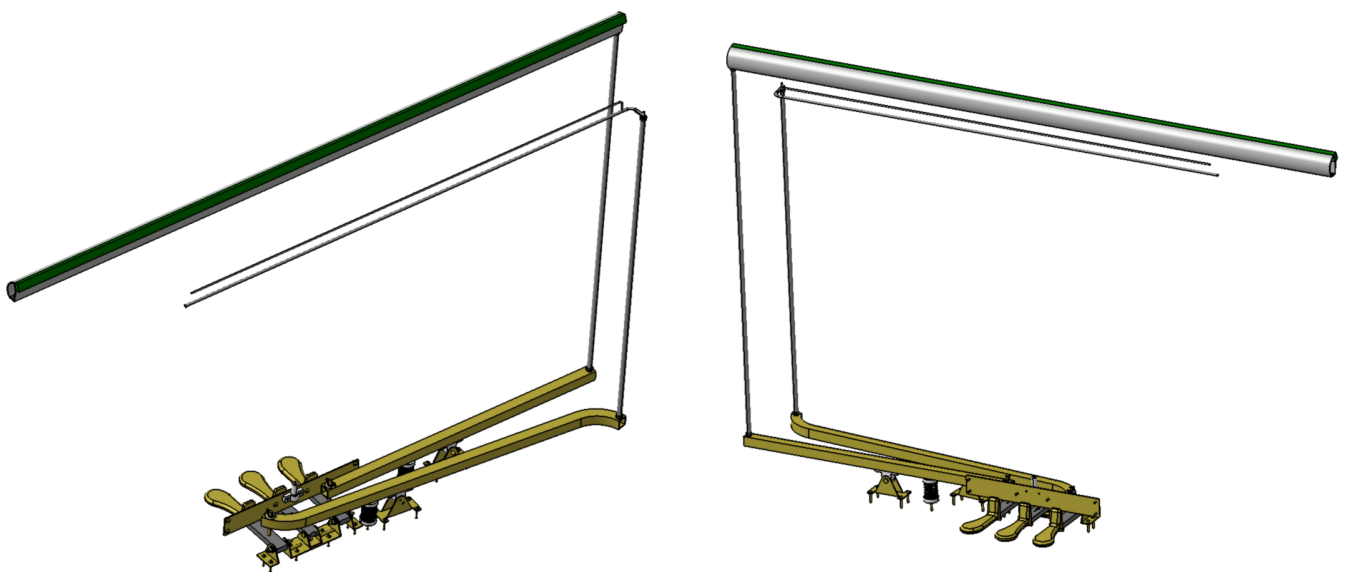


Figura 42. Mecanismos de los pedales. Fuente: elaboración propia.

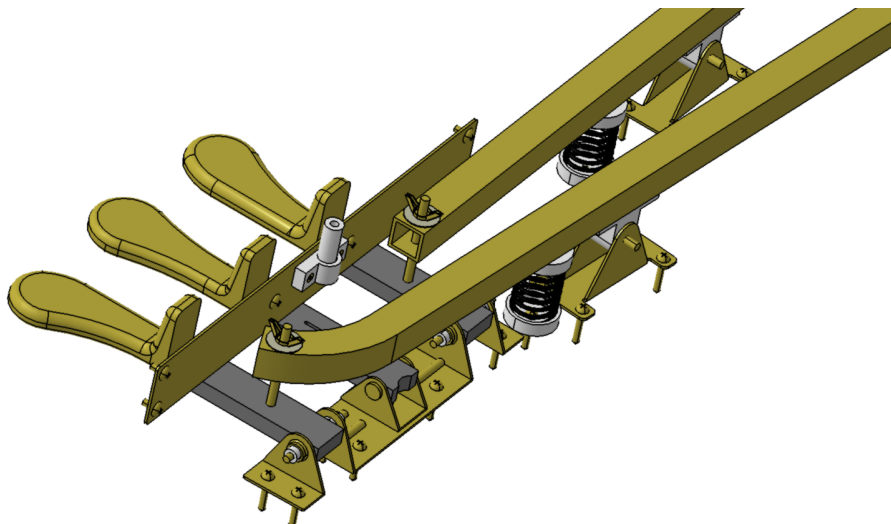


Figura 43. Detalle de los mecanismos de los pedales. Fuente: elaboración propia.

5.4. El bastidor

Aquí se presenta el modelado del bastidor, una gran pieza de metal creada por fundición, y los puentes que sirven de contacto entre las cuerdas y la tabla armónica.

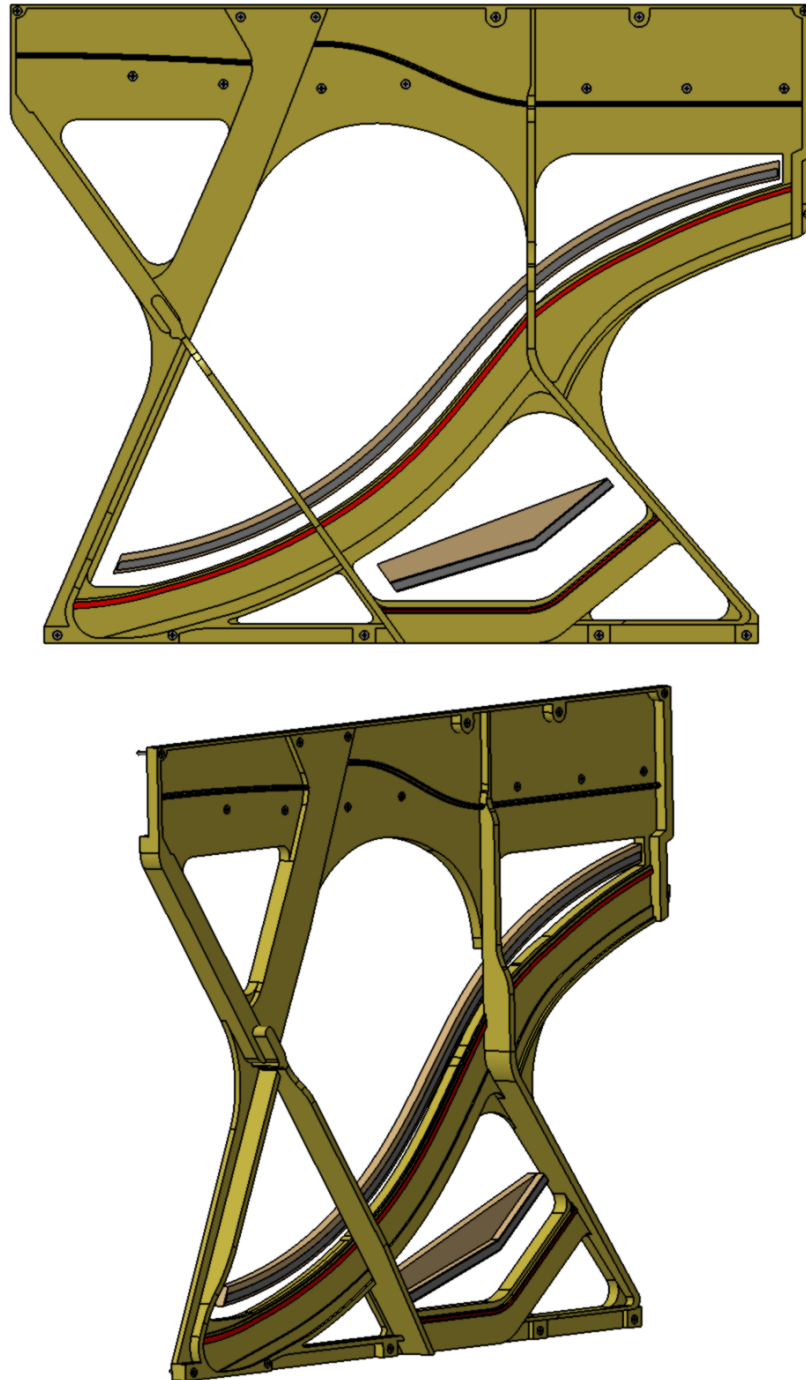


Figura 44. Bastidor. Fuente: elaboración propia.

Para ejemplificar el modelado de las cuerdas sólo se ha realizado una, debido a que cada cuerda precisa de no sólo un modelado individual complejo, sino también de varias piezas para su colocación. Además, el crear el modelo completo supondría la realización de 230 cuerdas, lo que consideramos excede el propósito de este trabajo.

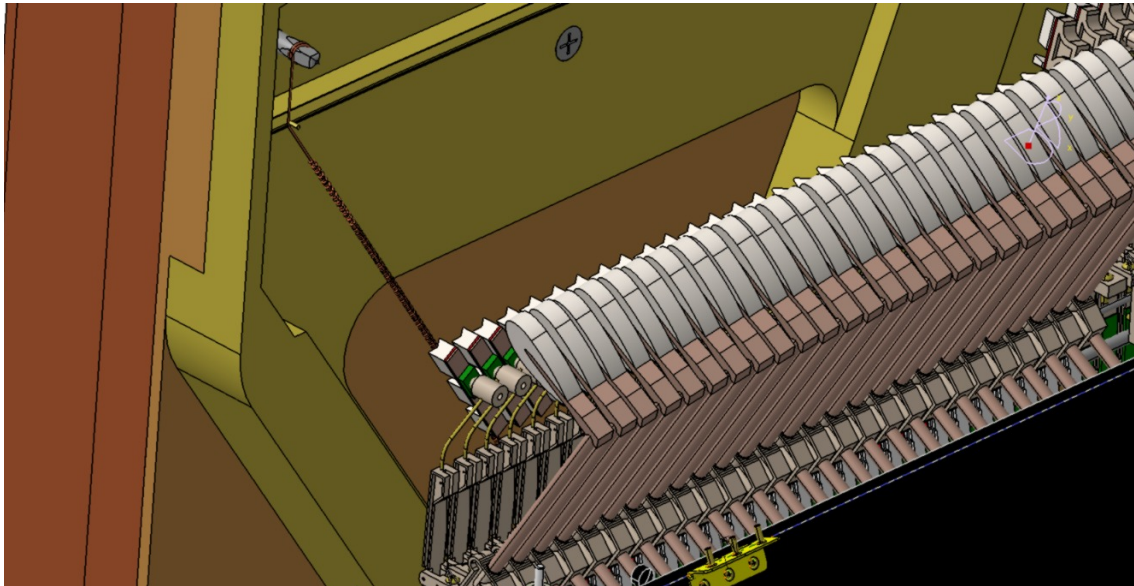


Figura 45. Cuerda y clavijero colocada en el mecanismo. Fuente: elaboración propia.

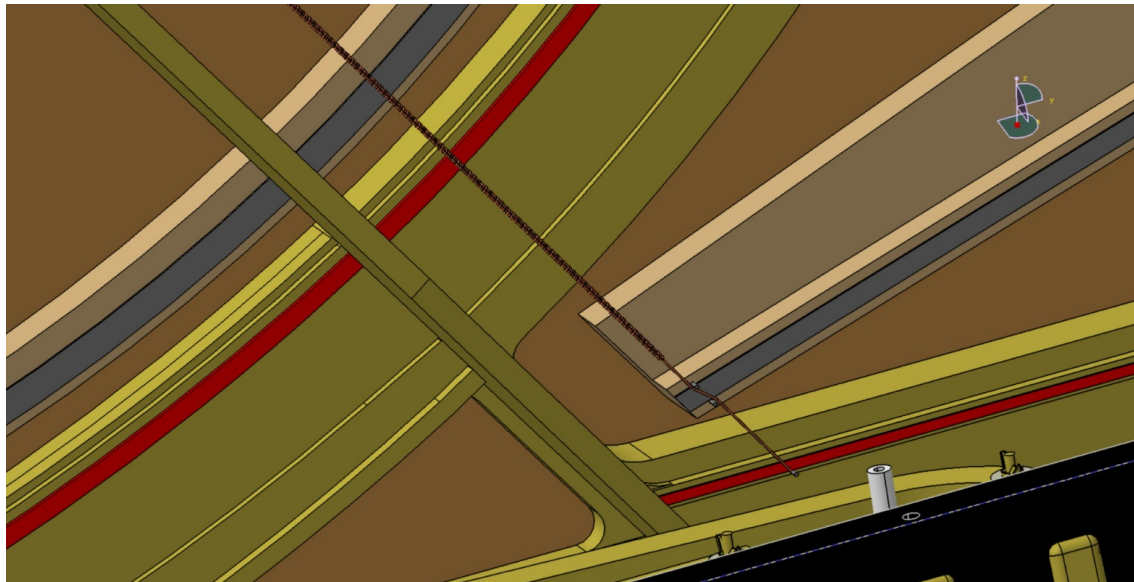


Figura 46. Cuerda y puente. Fuente: elaboración propia.

5.5. El exterior

Tenemos los siguientes conjuntos:

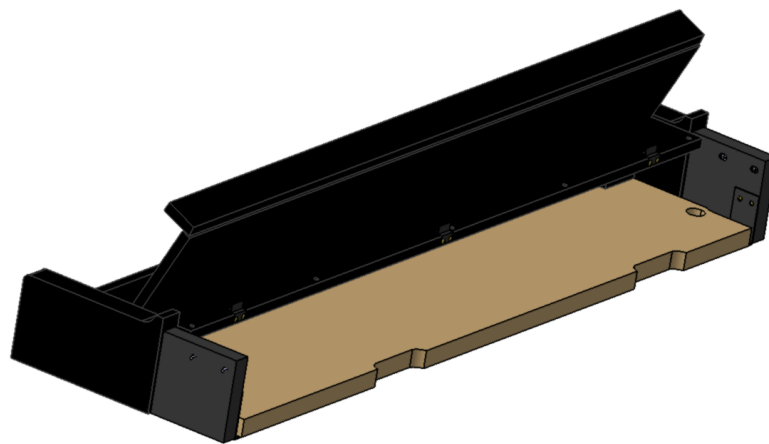
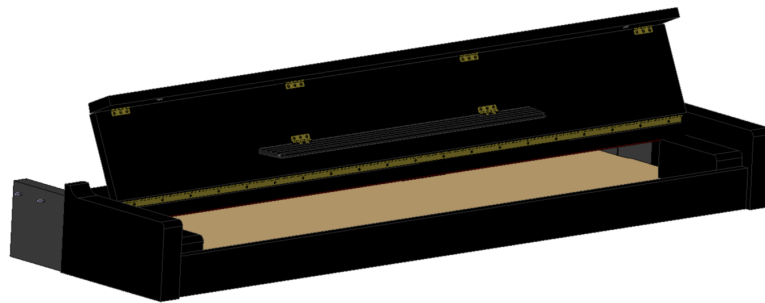


Figura 47. Tapa de las teclas. Fuente: elaboración propia.

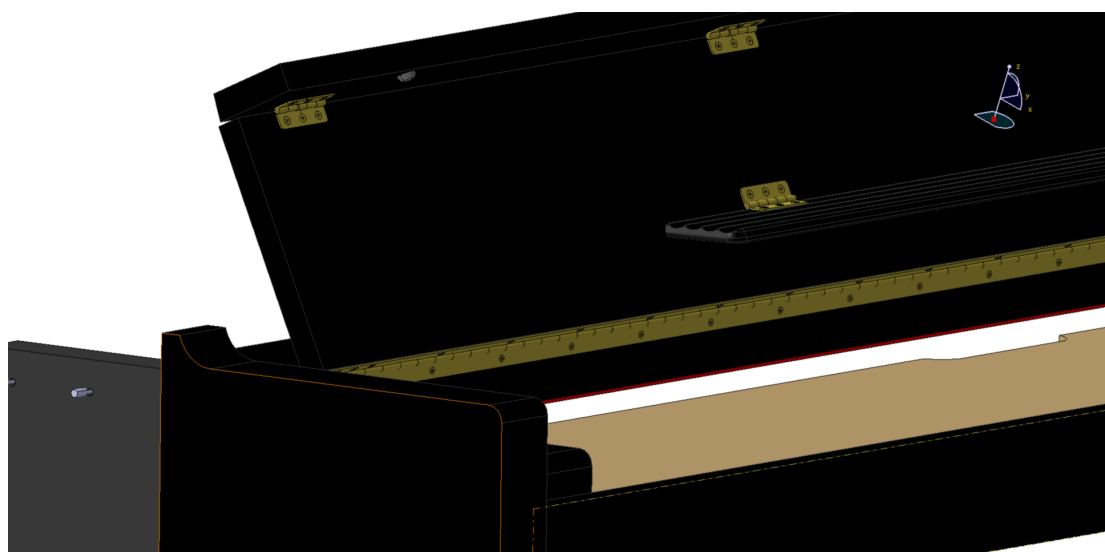


Figura 48. Detalle de la tapa. Fuente: elaboración propia.

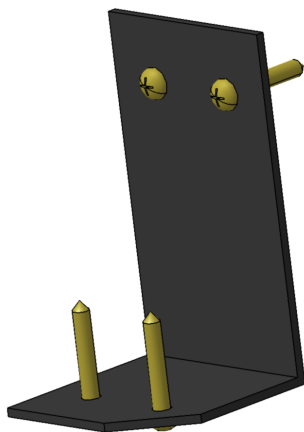


Figura 49. Sujeción 1.
Fuente: elaboración propia.

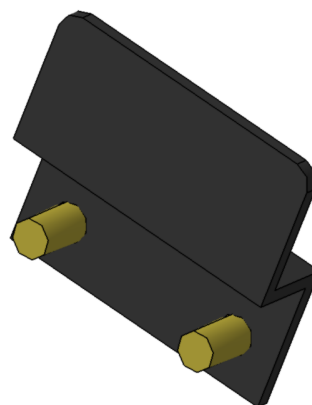


Figura 50. Sujeción de la tapa.
Fuente: elaboración propia.

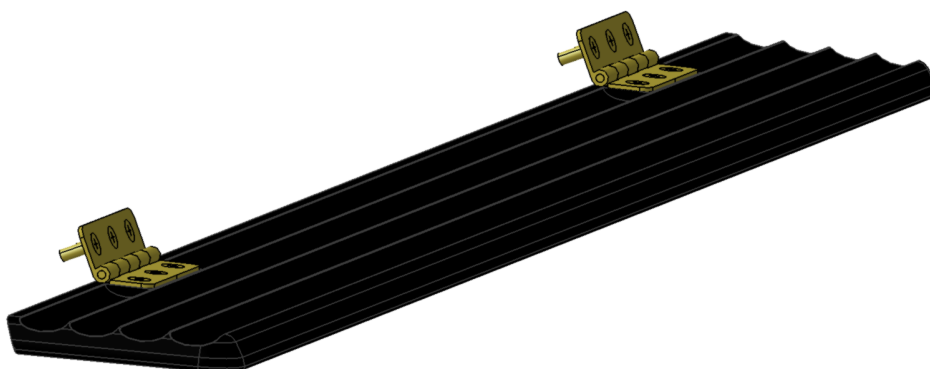


Figura 51. Atril. Fuente: elaboración propia.

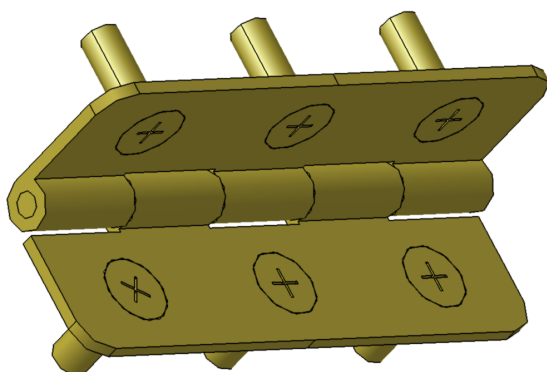


Figura 52. Bisagra. Fuente: elaboración propia.

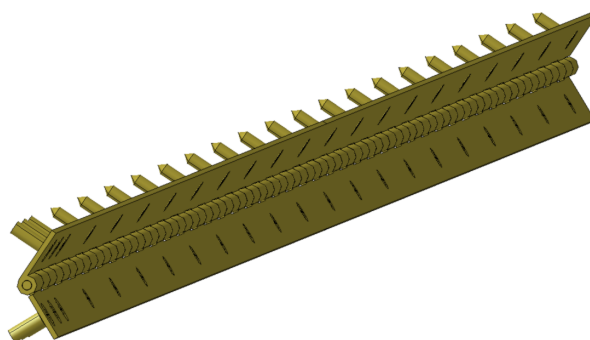


Figura 53. Bisagra larga. Fuente: elaboración propia.

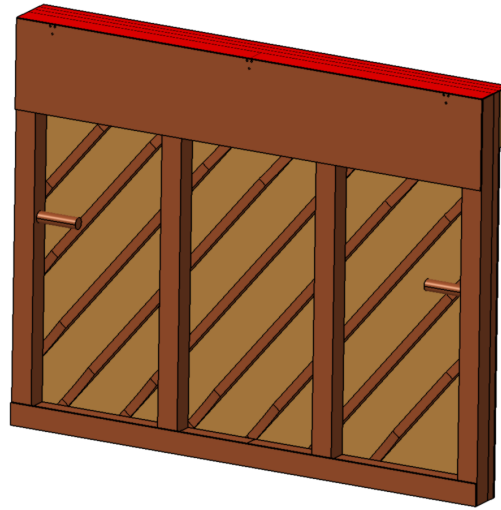


Figura 54. Parte trasera y tabla armónica. Fuente: elaboración propia.



Figura 55. Tapas delanteras y superior.
Fuente: elaboración propia.

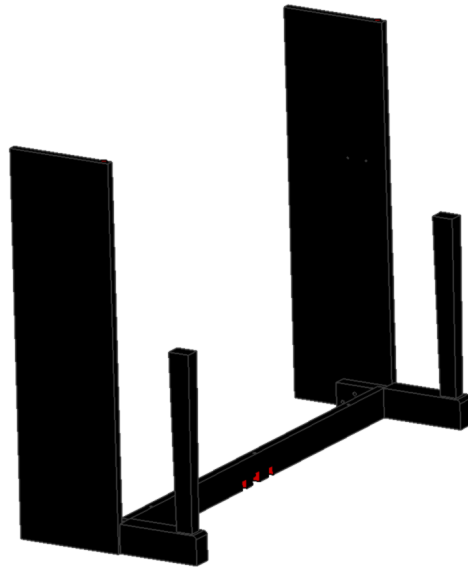


Figura 56. Tapas laterales y patas. Fuente: elaboración propia.



Figura 57. Suelo.
Fuente: elaboración propia.

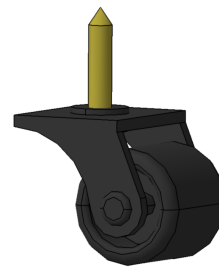


Figura 58. Rueda.
Fuente: elaboración propia.

El ensamblaje exterior sería:

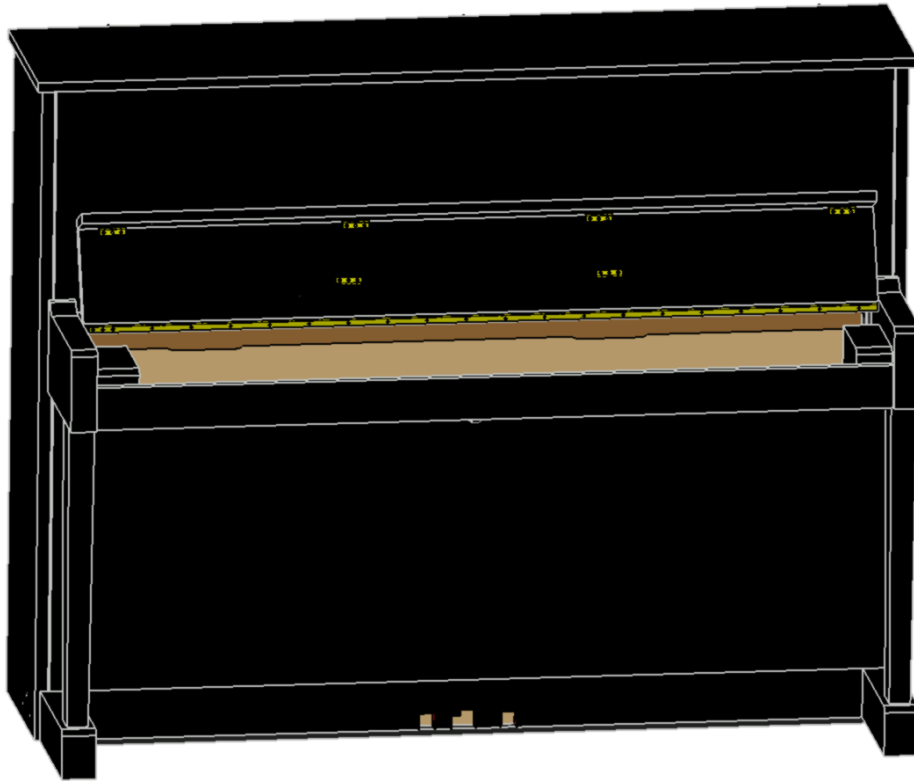


Figura 59. Ensamblaje exterior. Fuente: elaboración propia

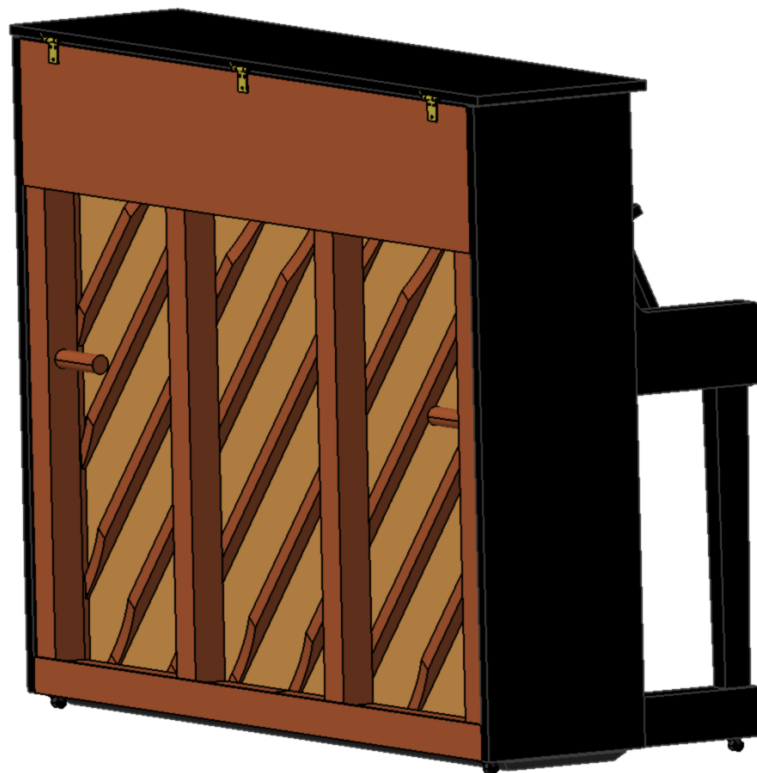


Figura 60. Ensamblaje exterior. Fuente: elaboración propia.

5.6. Análisis cinemático del mecanismo del teclado

A continuación, se realizará un análisis cinemático del mecanismo de las teclas a partir del modelo que ha sido creado. Se analizará cómo afecta la velocidad a la que se presiona la tecla con la velocidad con la que el martillo impacta.

Para ello, se van a llevar a cabo una serie de simplificaciones para facilitar el cálculo:

- Se mostrarán únicamente las piezas que afectan en la cinemática desde que se presiona la tecla hasta que el martillo golpea la cuerda.
- Los choques entre distintas piezas se considerarán totalmente elásticos.
- Se considerará que las velocidades, una vez que las piezas comienzan su movimiento, es constante durante todo el recorrido.

Así quedaría el mecanismo una vez eliminadas las piezas que no afectan en este cálculo:

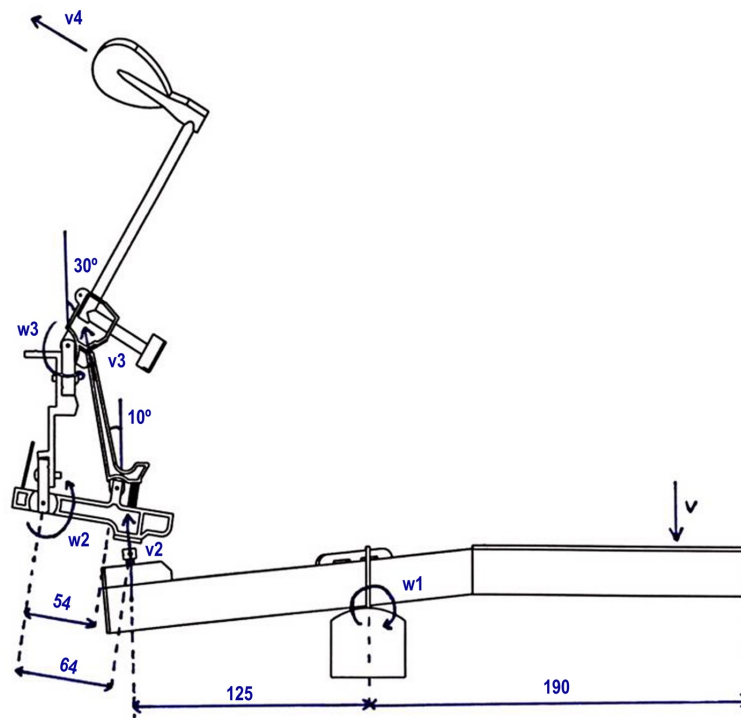


Figura 61. Esquema simplificado del mecanismo de una tecla. Fuente: elaboración propia.

Una vez tenidas en cuenta estas simplificaciones, se procede al cálculo, que se dividirá en 3 partes:

- Tecla
- Báscula y palanca de escape
- Nuez y macillo

5.6.1. Tecla

En este apartado se calculará la velocidad con la que el pilotín impacta en la báscula, que consideraremos que será la velocidad a la que se mueva la báscula en el punto de impacto. Se considerará la velocidad a la que se pulsa la tecla como v .

Velocidad de giro sobre el eje de la tecla: $\omega_{tecla} = \frac{v}{0,16} = 6,25v \text{ rad/s}$

Velocidad lineal del pilotín: $v_{pilotin} = \frac{v}{0,16} \cdot 0,125 = 0,781v \text{ m/s}$

5.6.1. Pilotín y eje de escape

El choque entre el pilotín y la báscula no es perfectamente plano, pero al existir un ángulo muy pequeño ($<5^\circ$) se desprecia su efecto.

Velocidad de giro sobre el eje de la báscula: $\omega_{bascula} = \frac{0,781v}{0,064} = 12,2v \text{ rad/s}$

Velocidad transmitida al eje de escape: $v_{escape} = 12,2v \cdot 0,054 = 0,66v \text{ m/s}$

5.6.1. Nuez y macillo

La velocidad transmitida de la palanca de escape a la nuez será:

Velocidad transmitida a la nuez: $v_{nuez} = v_{palanca} \cdot \cos(40) = 0,51v \text{ m/s}$

Velocidad de giro de la nuez: $\omega_{bascula} = 0,51v$

Velocidad del macillo: $v_{macillo} = \frac{0,51v}{0,105} = 4,86 \text{ m/s}$

Se concluye, por tanto, que la velocidad angular a la que el macillo golpea la cuerda es aproximadamente 5 veces mayor que la velocidad a la que se presiona la tecla.

6. RESULTADOS

Una vez llevado a cabo todo el modelado y posterior ensamblaje, se ha procedido a completar esta memoria con los resultados obtenidos. Para ello, se han renderizado imágenes del modelado usando el software KeyShot.



Figura 62. Vista general (renderizada). Fuente: elaboración propia.



Figura 63. Vista general (renderizada). Fuente: elaboración propia.



Figura 64. Interior (renderizado). Fuente: elaboración propia.

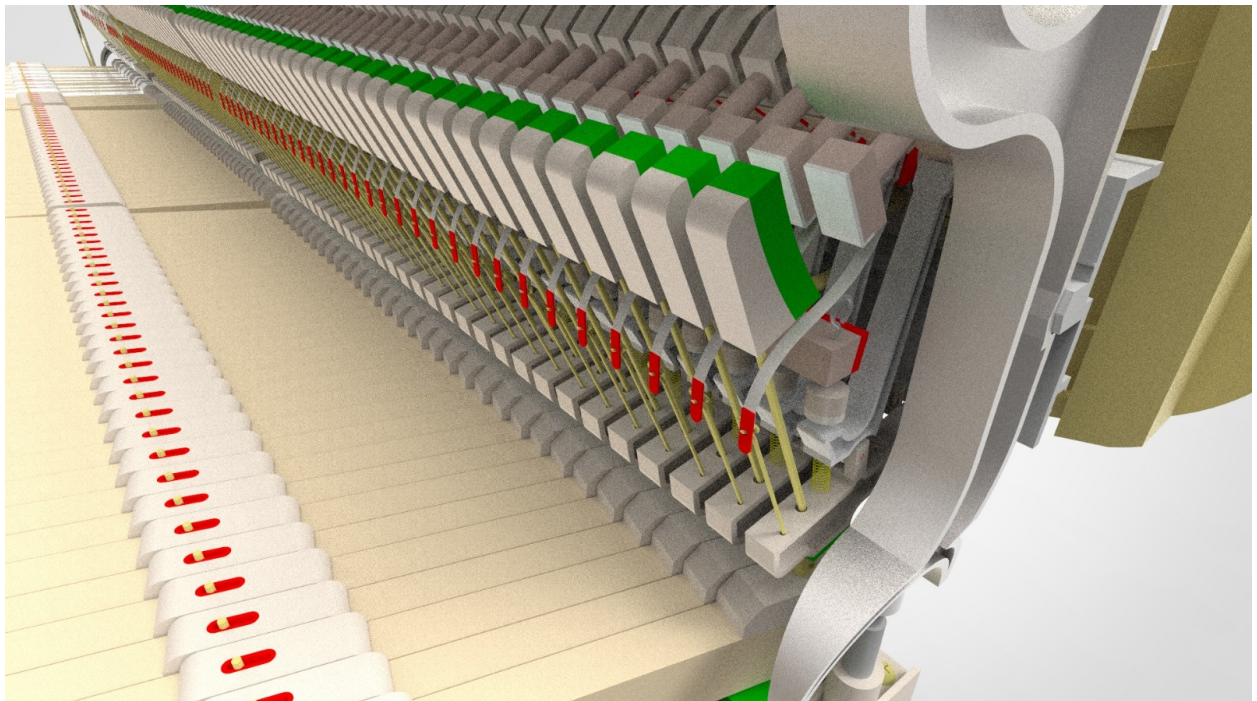


Figura 65. Detalle mecanismo (renderizado). Fuente: elaboración propia.



Figura 66. Detalle teclado (renderizado). Fuente: elaboración propia

7. CONCLUSIONES. PROYECCIÓN DEL TRABAJO

En este último apartado se desarrollan las conclusiones del trabajo, futuras mejoras y se analiza la proyección que puede tener este para futuras aplicaciones, tanto desde el punto de vista ingenieril, como desde el punto de vista didáctico.

Como conclusión, decir que el resultado de modelar un mecanismo de maquinaria muy compleja (para la época de la que data) ha resultado satisfactorio, pues, aunque no esté del todo completo, la mayoría de las piezas y mecanismos que subyacen en el piano están presentes, y el conjunto, como se ha podido comprobar, se asejema bastante a la realidad.

Además, se ha puesto de manifiesto una parte del gran potencial que supone la herramienta de modelado 3D Catia, y su capacidad para poder reproducir y ensamblar piezas y conjuntos de todo tipo. Esto se debe a la gran cantidad de soluciones que presenta para el usuario, de las cuales se han utilizado una gran cantidad a lo largo del desarrollo del trabajo. Además, presenta una gran versatilidad, y permite simplificar mucho los procesos si se usa de forma adecuada, lo que permite realizar modificaciones que afectan a todo el conjunto de una forma sencilla y eficaz.

Con respecto a la proyección del trabajo, al no estar el modelado del todo completo, permite una continuación de este hasta acabar con el modelado, así como de trabajar con el módulo MDU Kinematics que proporciona Catia para realizar animaciones de los distintos mecanismos del piano.

Otro aspecto con el que se podría trabajar a partir de este proyecto es estudiar la posibilidad de mediante algún software hacer que el mecanismo cumpla con la función para el que realmente está creado, es decir, que incorpore los sonidos característicos del piano y suene según la posición del mecanismo, e incluso desde el punto de vista dinámico, según la fuerza que se aplique o la velocidad a la que se mueva.

Otra posible proyección sería a partir de este modelo realizar una simplificación del mismo, de forma que, reducido, se pudiera imprimir las distintas piezas en 3D, de forma que se pudieran ensamblar manualmente y de esta forma sirviera para múltiples fines, como podría ser la creación de versiones más pequeñas y portátiles del instrumento, o incluso hacer las veces de juguete de montaje y aprendizaje para niños.

Por último, para desarrollar proyectos orientados a la docencia y la formación, se proyecta su aplicación en las escuelas de música y conservatorios, ya que en muchas ocasiones, dada la complejidad del instrumento y la dificultad de llevar a cabo un despiece que posibilite ilustrar el mecanismo, se echa de menos la existencia de modelos visuales que de una forma sencilla y accesible, posibiliten al alumno conocer a fondo el complejo sistema mecánico que conforma un piano como instrumento de estudio y formación musical.

REFERENCIAS

- [1]. “Piano vertical KAWAI de la serie K”. Imagen disponible en: <https://ortizo.com.co/products/piano-vertical-kawai-k300>
- [2]. “Bartolomeo Cristofori”. Imagen disponible en: <http://franmaestromusica.blogspot.com/2015/05/el-doodle-del-dia-bartolomeo-cristofori.html>
- [3]. “Monocordio”. Imagen disponible en: <http://www.centrodedocumentacionmusicaldeandalucia.es/opencms/musica-tradicional/archivo-instrumental/cordofonos/387-monocordio-cuerda-pulsada.html>
- [4]. “Cítara”. Imagen disponible en: <https://www.todocoleccion.net/instrumentos-musicales/citara-simarra-instrumento-musical-43cm-anos-80~x100698139>.
- [5]. “Clavecín”. Imagen disponible en: <https://instrumentosmusicales10.net/clavecín-historia-sonido>
- [6]. “Clavicordio”. Imagen disponible en: <https://www.ecured.cu/Clavicordio>
- [7]. “Piano de Cristofori”. Imagen disponible en: https://www.metmuseum.org/toah/hd/cris/hd_cris.htm
- [8]. “Información de la historia del piano” [en línea]. Disponible en: <https://hinves.com/blog/la-historia-del-piano-etimologia-y-origenes/>
- [9]. “Información de la historia del piano” [en línea]. Disponible en: <https://www.el-atril.com/orquesta/Instrumentos/Piano.htm>
- [10]. “Información de los tipos de piano [en línea]. Disponible en: <https://musica-barroca.com/instrumentos/>
- [11]. “Información de las partes del piano” [en línea]. Disponible en: <https://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0653-02/p5.html>
- [12]. “Información de las partes del piano” [en línea]. Disponible en: <https://www.partesdel.com/piano.html>
- [13]. “Información de las partes del piano” [en línea]. Disponible en: <http://www.entre88teclas.es/el-piano-partes-del-piano>
- [14]. “Tabla armónica”. Imagen disponible en: <https://www.corralespianos.com/piano-vertical-kemble-k109-coleccion-preludio/>
- [15]. “Caja”. Imagen disponible en: <https://www.promusica.es/2001911-pianos-verticales>
- [16]. “Información del Piano Kawai K-25” [en línea]. Disponible en: <https://kawaiispain.com/historia-de-kawai/>
- [17]. “Información del Piano Kawai K-25” [en línea]. Disponible en: <https://laguiadelpiano.com/kawai/>
- [18]. “Información sobre los modelos verticales. Serie K” [en línea]. Disponible en: <https://kawaiispain.com/pianos-verticales/>

- [19]. “Mecanismo de escape con sus componentes detallados”. Imagen disponible en: <https://infovisual.info/es/musica/mecanismo-del-piano-vertical>
- [20]. “Información e imágenes acerca de la mecánica y acústica del piano” [en línea]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11055/fichero/SINTESIS+DIGITAL+DE+INSTRUMENTOS+MUSICALES%252F2.+ANALISIS+DEL+MECANISMO+DEL+PIANO.pdf>
- [21]. “Información e imágenes del calibre” [en línea]. Disponible en: <http://como-funciona.co/un-calibre/>
- [22]. “Información acerca de la cinta métrica” [en línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Cinta_métrica
- [23]. “Información e imagen acerca de las galgas de radio” [en línea]. Disponible en: <https://www.itcsoldadura.org/es/detalle/material-de-inspeccion/1297/galga-de-radios>
- [24]. “Transportador de ángulos”. Imagen disponible en: <http://drums1a.blogspot.com/2011/02/instrumentos-de-arquitectura.html>
- [25]. “Información acerca de los Software CAD” [en línea]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/stigestionydesarrollo/recuperacion/desarrollo-1/recuperacion-tema-4---desarrollo/7>
- [26]. “Información acerca de los campos de aplicación de los Software de CAD” [en línea]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/stigestionydesarrollo/recuperacion/desarrollo-1/recuperacion-tema-4---desarrollo/7>
- [27]. “Información sobre Software CAD” [en línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/mejores-sofware-cad-programa-180320192/>
- [28]. “Información sobre CATIA” [en línea]. Disponible en: <https://grupocarman.com/blog/catia-v5/>
- [29]. “Información sobre CATIA” [en línea]. Disponible en: <https://cadtech.es/catia-funcionalidades-de-ingenieria-moldes-y-piezas-de-plastico/c>
- [30]. “Información sobre el módulo part design” [en línea]. Disponible en: https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/catia/productos/catia-v5/portfolio/domain/Mechanical_Design/product/PDG/
- [31]. “Información sobre el módulo assembly design” [en línea]. Disponible en: https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/catia/productos/catia-v5/portfolio/domain/Mechanical_Design/product/ASD/